

RODRIGO STANGE TESSINARI

**Integração do Plano de Transporte com os Planos de Controle e de  
Gerência em Redes OTN: Uma Abordagem Via Simulação**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Anilton Salles Garcia

VITÓRIA

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

T341i Tessinari, Rodrigo Stange, 1986-  
Integração do Plano de Transporte com os planos de controle  
e de gerência em redes OTN : uma abordagem via simulação /  
Rodrigo Stange Tessinari. – 2011.  
104 f. : il.

Orientador: Anílton Salles Garcia.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Redes ópticas de transporte. 2. Simulação (Computadores).  
3. Telecomunicações. I. Garcia, Anílton Salles. II. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

---

**RODRIGO STANGE TESSINARI**

**Integração do Plano de Transporte com os Planos de Controle e de  
Gerência em Redes OTN: Uma Abordagem Via Simulação**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Anilton Salles Garcia - Orientador**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Antônio Manoel Ferreira Frasson**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Maxwell Eduardo Monteiro**  
**Instituto Federal do Espírito Santo**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu pai por ter me ajudado durante toda a jornada e ter me motivado durante os momentos mais difíceis, e à minha mãe por todo o apoio, carinho e as dezenas de garrafas de café, por ela preparadas.

À minha namorada Renata, pela companhia nos bons momentos e apoio e compreensão nos momentos difíceis.

Aos meus amigos e companheiros de faculdade Carlos Vendramini, Douglas Almonfrey, Estefhan Dazzi, Fabbiano Ferrari, Igor Magri, Júlio Storch, Mayler Martins, Pedro Paulo e Thiago Almeida, dentre outros, pela ajuda, ideias, correções ou apenas pelos momentos de conversa na cantina.

Ao meu orientador Prof. Dr. Anilton, pela oportunidade de trabalharmos por mais de três anos, resultando em um grande aprendizado, tanto acadêmico quanto pessoal.

Aos membros da banca, Antônio Manoel Ferreira Frasson e Maxwell Eduardo Monteiro, pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho.

À Padtec pelos projetos desenvolvidos em parceria com a UFES, oferecendo a oportunidade de conhecer na prática tecnologias de ponta utilizadas no mundo das telecomunicações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela oportunidade e suporte financeiro que permitiram a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos próximos que mesmo não tendo contribuído de forma direta, contribuíram indiretamente, com seu carinho, fé e pensamento positivo.

## RESUMO

O cenário atual das redes de telecomunicações, principalmente das redes ópticas, é de mudanças rápidas. Novas tecnologias apresentam um desafio considerável para os pesquisadores envolvidos com a nova geração de redes de alto desempenho, principalmente no que se refere à otimização da infraestrutura atual de fibras ópticas disponíveis nos *backbones*.

As Redes Ópticas de Transporte (*OTN – Optical Transport Network*), baseadas em multiplexação WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*) e no SONET/SDH (*Synchronous Optical NETWORK/ Synchronous Digital Hierarchy*), consolidam-se como uma tecnologia capaz de responder a esse cenário, cabendo à ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Section*) fornecer a padronização aos fabricantes de equipamentos e de soluções de redes de transporte.

Em suma, devido aos elevados custos envolvidos no desenvolvimento e implantação de novas tecnologias, torna-se essencial o uso de ferramentas de simulação, permitindo reproduzir e comparar resultados de diferentes frentes de pesquisa com maior facilidade.

Esta dissertação tem como objetivo geral prover a extensão, adaptação e integração de trabalhos anteriores e em atual desenvolvimento pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Telecomunicações (LabTel) na UFES. Esses trabalhos englobam diversas áreas relacionadas com as redes ópticas de transporte, como plano de controle, plano de transporte e a funcionalidade de descoberta automática.

Palavras-chave: OTN, Redes Ópticas de Transporte, ITU-T G.798, Plano de Controle, Plano de Gerência, Plano de Transporte, Simulação, OMNeT++.

## **ABSTRACT**

In the current scenario of optical networks, technology is rapidly changing. New developments presents a significant challenge for researchers involved with the new generation high-performance networks, especially when it comes to optimization of optical fiber's backbones' infrastructure.

Optical Transport Networks (OTN) based on Wavelength-Division Multiplexing (WDM) and Synchronous Optical NETwork/Synchronous Digital Hierarchy (SONET/SDH), consolidating as a technology capable of responding to this scenario, while the ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication Section) is responsible to provide a standardization for manufacturers of equipment and transport network solutions.

In short, due to the high costs involved in the development and deployment of new technologies is essential to use simulation tools, allowing the ability to reproduce and compare results from different research fronts more easily.

This dissertation aims to provide a general extension, adaptation and integration of previous and current development by the research group of the Laboratory of Telecommunications (LabTel – Laboratório de Telecomunicações) at UFES. These works includes several areas related to optical transport networks, such as control plane, transport plane and automatic discovery functionality.

Keywords: OTN, Optical Transport Network, ITU-T G.798, GMPLS, Simulation, OMNeT++.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação ITU-T G.805. (ITU-T, 2000) .....	27
Figura 2-2: Fluxo de informação em uma rede OTN. ....	29
Figura 2-3: Exemplo de rede WDM. (KARTALOPOULOS, 2008) .....	31
Figura 2-4: Amplificador de linha representado por funções de processamento. (ITU-T, 2001) .....	31
Figura 3-1: Modelo organizacional da gerência de um ONE. ....	39
Figura 3-2: Modelo de plano de gerência. ....	41
Figura 3-3: Proposta de arquitetura para plano de gerência. ....	42
Figura 3-4: Arquitetura para o plano de controle Proposta em (FAVORETO, 2009). ....	44
Figura 3-5: Proposta de uso do OSC. (a) Figura original (FAVORETO, 2009), (b) Visão da terminação de trilha OTSn_TT_So. ....	45
Figura 3-6: Arquitetura proposta, realçando o relacionamento entre os diferentes planos. ....	48
Figura 3-7: Cabeçalho da hierarquia óptica OTN. (ITU-T, 2010). ....	49
Figura 3-8: Modelo para inserção das mensagens de controle no OSC. ....	50
Figura 4-1: Relação hierárquica entre os módulos (Perez, 2005). ....	53
Figura 4-2: Estruturação por pastas do <i>framework</i> de simulação de redes OTN. ....	54
Figura 4-3: (a) Representação dos pontos de referência da OTSn_TT_Sk. (b) Terminação de trilha da camada OTS, emissor ( <i>Source</i> ) e receptor ( <i>Sink</i> ). (ITU-T, 2010). ....	56
Figura 4-4: Código na Linguagem NED (a) e representação gráfica (b) da AF OTSn_TT_Sk. ....	57
Figura 4-5: Processos da OTSn_TT_Sk. (ITU-T, 2010) .....	58
Figura 4-6: Organização dos arquivos relacionados com o plano de transporte. ....	59
Figura 4-7: Mensagem representando um sinal óptico (OTNMsg). ....	61
Figura 4-8: OTNMsg com ênfase nas mensagens encapsuladas. ....	61
Figura 4-9: Organização dos arquivos relacionados com o plano de gerência. ....	63

Figura 4-10: Estrutura OMSinfo, responsável por armazenar os alarmes originados na Função Atômica OMSn_TT_Sk.....	65
Figura 4-11: Relação entre as mensagens e os sinais na recomendação ITU-T G.798. ....	67
Figura 4-12: (a) Módulo GMPLS_LSR composto por um controlador GMPLS e um OXC. (b) Módulo OXC em destaque. (FAVORETO, 2009). ....	68
Figura 4-13: Novo módulo OXC, destacando a gerência e o módulo OTH.....	70
Figura 4-14: Controlador GMPLS. (a) (FAVORETO, 2009). (b) Versão atualizada...	71
Figura 5-1: Rede de teste do plano de controle. (FAVORETO, 2009) .....	76
Figura 5-2: Inicialização de um OXC no modo bloqueado. ....	77
Figura 5-3: Bloqueio da mensagem “host1MSG”, pelo LSR1, no tempo 0.2s. ....	77
Figura 5-4: Trechos do <i>log</i> obtidos durante a simulação.....	78
Figura 5-5: Rede de teste com falha. ....	79
Figura 5-6: Esquema da topologia da rede de teste. (a) rede em funcionamento normal. (b) Corte na fibra entre HOST_0 e AMP1.....	79
Figura 5-7: Propagação dos sinais pela rede. (a) Emissão do PMI pelo AMP1. (b) Detecção das falhas pelo ONE OXC_0.....	80
Figura 5-8: Propagação das falhas pela rede.....	81
Figura 5-9: Log simplificado gerado na simulação. ....	82
Figura A-1: Módulo transponder (FRIGINI, 2010). ....	90
Figura A-2: Hierarquia óptica (TESSINARI, 2009). ....	91
Figura A-3: (a) Controlador GMPLS. (b) LSR GMPLS. (FAVORETO, 2009) .....	91
Figura A-4: ONE Amplificador bidirecional. (TESSINARI, 2009) .....	92
Figura B-1: Trecho do arquivo de log gerado durante o estabelecimento de um OCh LSP. (FAVORETO, 2009) .....	93
Figura I-1: Implementação da classe cOTSn_TT_Sk.....	94
Figura I-2: (a) Sinais clientes e das camadas digitais. (b) Sinais de cabeçalho das camadas ópticas e canal de supervisão. (c) Sinal de alarmes. (d) Sinal óptico. ....	95
Figura I-3: Trecho do arquivo de configuração OTN_Config.h. ....	96
Figura I-4: Arquivo NED do Gerente Local. ....	97



Figura I-5: Classe cLocalManager.cc. ....	98
Figura I-6: Mensagens utilizadas pelo plano de gerência. ....	98
Figura I-7: Mensagens representando os sinais trocados com as funções atômicas. .....	99
Figura I-8: Mensagens utilizadas na comunicação entre os planos de controle, gerência e transporte. ....	100
Figura II-1: Amplificadores.....	101
Figura II-2: Multiplexadores e Demultiplexadores. ....	101
Figura II-3: Módulo gerente. ....	102
Figura II-4: ONE Host OTN. ....	102
Figura II-5: ONE OXC. ....	103
Figura III-1: Log completo gerado na simulação de falha na fibra.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1: Sinais de entradas e saída da terminação de trilha OTSn_TT_Sk. (ITU-T, 2010) .....	56
Tabela 4-2: Período dos quadros OPU/ODU e OTU. (ITU-T, 2009). .....	62
Tabela 4-3: Informações gerais sobre o <i>framework</i> de simulação. ....	73
Tabela 5-1: Tabela resumindo os defeitos detectados e os sinais enviados à gerência.....	81
Tabela 6-1: Resumo do que foi desenvolvido nesta dissertação. ....	84

## LISTA DE SIGLAS/ACRÔNIMOS

3R - *Reamplification, Reshaping and Retiming*

AF - *Atomic Function*

AI - *Adapted Information*

AP - *Access Point*

API - *Application Programming Interface*

ASON - *Architecture for the Automatically Switched Optical Network*

ATM - *Asynchronous Transfer Mode*

BDI-P - *Backward Defect Indication Payload signal*

BDI-O - *Backward Defect Indication Overhead signal*

CP - *Connection Point*

CI - *Characteristic Information*

COMMS OH - *General management communications overhead*

D&T - *Date and Time*

DA - *Discovery Agent*

DAa - *Amplifier-aided Dispersion Accommodation*

DCN - *Data Communications Network*

DTH - *Digital Transport Hierarchy*

DWDM - *Dense Wavelength-Division Multiplexing*

EMF - *OTN Equipment Management Function*

FCAPS - *Fault Management, Configuration Management, Account Management, Performance Management and Security Management*

FEC - *Forward Error Correction*

GCC - *General Communications Channel*

GFP - *Generic Framing Procedure*

GMPLS - *Generalized Multi-Protocol Label Switching*

IETF - *Internet Engineering Task Force*

IP - *Internet Protocol*

ITU-T - *International Telecommunication Union – Telecommunication Section*

LOS-P - *Loss Of Signal Payload*

LOS-O - *Loss Of Signal Overhead*

LSP - *Label Switched Path*

LSR - *Label Switching Router*

MAF - *Management Application Function*

MCF - *Message Communications Function*

MI - *Management Information*

MI\_TIMDetMo - *Trail trace Identifier Mismatch Detection Mode*

MIB - *Management Information Base*

MP - *Management Point*

NED - *Network Description*

NNI - *Network-Network Interface*

OA - *Optical Amplifier*

OADM - *Optical Add/Drop Multiplexers*

OAM&P - *Operation, Administration, Maintenance and Provisioning*

OCh - *Optical Channel*

OCh LSP - *Optical Channel Label Switched Path*

ODU - *Optical Channel Data Unit*

O-E-O - *Óptico-Eléctrico-Óptico*

OMNeT++ - *Objective Modular Network Testbed*

OMS - *Optical Multiplex Section*

ONE - *Optical Network Element*

OPU - *Optical Channel Payload Unit*

OSC - *Optical Supervisory Channel*

OSPF-TE - *Open Shortest Path First – Traffic Engineering*

OTH - *Optical Transport Hierarchy*

OTM-n - *Optical Transport Module-n*

OTN - *Optical Transport Network*

OTS - *Optical Transmission Section*

OTU - *Optical Channel Transport Unit*

OTUk - *Optical Transmission Unit of level k*

OXC - *Optical Cross-connect*

PMDC - *Polarization Mode Dispersion Compensation*

PMI - *Payload Missing Indication*

PPP - *Point-to-Point Protocol*

RFC - *Request for Comments*

RI - *Remote Information*

ROADM - *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*

RP - *Remote Point*

RSVP - *Resource Reservation Protocol*

RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*

SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*

Sk - *Sink*

So - *Source*

SONET - *Synchronous Optical NETWORK*

TCM - *Tandem Connection Monitoring*

TCP - *Termination Connection Point*

TDM - *Time-Division Multiplexing*

TED - *Traffic Engineering Database*

TI - *Tecnologia de Informação*

TTI - *Trail Trace Identifier*

UNI - *User-Network Interface*

WA - *Wavelength Assignment*

WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS .....	19
1.4	METODOLOGIA .....	20
1.5	TRABALHOS RELACIONADOS.....	20
1.6	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES .....	20
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	22
2.2	REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE .....	23
2.2.1	Recomendações OTN .....	24
2.2.2	Componentes Arquiteturais de uma rede de transporte genérica .....	26
2.2.3	Estrutura de Camadas.....	28
2.2.4	Equipamentos OTN .....	30
2.3	PLANOS DE TRANSPORTE, DE CONTROLE E DE GERÊNCIA.....	32
2.4	SIMULAÇÃO DE REDES ÓPTICAS .....	32
2.5	TRABALHOS RELACIONADOS .....	33
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>36</b>
3.1	ARQUITETURA DE PLANO DE GERÊNCIA E INTEGRAÇÃO COM A DESCOBERTA AUTOMÁTICA.....	37
3.1.1	Um pouco sobre a Descoberta Automática .....	37
3.1.2	Um pouco sobre o Plano de Gerência.....	38
3.1.3	Proposta de arquitetura para o Plano de Gerência .....	40
3.2	ARQUITETURA DE PLANO DE CONTROLE E INTEGRAÇÃO COM OS PLANOS DE TRANSPORTE E GERÊNCIA.....	43
3.2.1	Primeira versão de plano de controle .....	43
3.2.2	Proposta de arquitetura de plano de controle.....	47

3.3	CONCLUSÃO .....	51
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO .....</b>	<b>52</b>
4.1	O SIMULADOR OMNET++ .....	52
4.2	SIMULAÇÃO DE REDES OTN .....	54
4.2.1	Plano de Transporte .....	54
4.2.2	Plano de Gerência .....	63
4.2.3	Plano de Controle .....	67
4.2.4	Considerações Finais .....	73
<b>5</b>	<b>TESTES .....</b>	<b>74</b>
5.1	EQUIPAMENTOS OTN .....	74
5.2	REDES DE TESTE .....	75
5.2.1	Caso de Teste 1: Plano de controle .....	75
5.2.2	Caso de Teste 2: Rede com falha .....	79
5.3	CONCLUSÕES .....	82
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
6.1	RESULTADOS .....	83
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	85
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO B – RESULTADOS DE OUTROS TRABALHOS .....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE I – CLASSES , MENSAGENS E MÓDULOS SIMPLES .....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE II – EQUIPAMENTOS MODELADOS .....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE III – RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>104</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O cenário atual das redes de telecomunicações, principalmente das redes ópticas, é de mudanças rápidas. O estabelecimento de novas classes de serviço, como *streaming* de vídeos de alta definição, *backup* e sincronismo de dados em servidores remotos, muitos desses serviços abrangendo, inclusive, dispositivos móveis, constituem um desafio cada vez maior para as redes de núcleo. Neste contexto as redes de transporte precisam ser adaptadas às novas necessidades, e como resultado da inovação tecnológica, novos equipamentos são criados, com cada vez mais funcionalidades e maior complexidade. Essas novas tecnologias apresentam um desafio considerável para os pesquisadores envolvidos com a nova geração de redes de alto desempenho, notadamente no que se refere à otimização da infraestrutura atual de fibras ópticas disponíveis nos *backbones*.

As Redes Ópticas de Transporte (OTN – *Optical Transport Network*), baseadas na multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength-Division Multiplexing*) e no *Synchronous Optical NETWORK/ Synchronous Digital Hierarchy* (SONET/SDH), consolida-se como uma tecnologia capaz de responder a esse cenário, cabendo ao Setor de Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Section*) fornecer uma padronização para os fabricantes de equipamentos e soluções de redes de transporte.

Inicialmente, as redes de transporte eram basicamente ponto-a-ponto e/ou compostas por dispositivos com pouca flexibilidade como *Optical Add/Drop Multiplexers* (OADM), onde a topologia e todo o processo de *Wavelength Assignment* (WA) eram planejados em tempo de projeto da rede. Recentemente, os *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers* (ROADM) agregaram maior flexibilidade à rede, por possibilitar a aplicação de métodos de engenharia de tráfego e uso de mecanismos de proteção e restauração.

No entanto, o crescimento em complexidade das redes OTN com o uso de dispositivos reconfiguráveis implica em custos de operação cada vez maiores, aumentando a importância do plano de controle e do plano de gerência que, dentre outras funções, permitem a automatização de tarefas como: cálculo de novas rotas durante um estado de falha da rede e, até mesmo, a detecção desse estado e isolamento da(s) falha(s).

Em suma, devido aos elevados custos envolvidos no desenvolvimento e implantação de novas tecnologias, torna-se essencial o uso de ferramentas de modelagem e análise para avaliação eficiente de novas ideias e projetos. As simulações, por sua vez, se apresentam como uma das opções deste tipo de ferramenta, e, neste cenário, um ambiente uniforme para a simulação de redes OTN torna-se de extrema importância, permitindo reproduzir e comparar resultados de diferentes frentes de pesquisa com maior facilidade.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente existem vários projetos em andamento no LabTel (Laboratório de Telecomunicações) UFES, relacionados com as recomendações para redes ópticas de transporte. Após uma série de pesquisas em artigos científicos (TAKIHIRO, FUKASHIRO, *et al.*, 2009), (IMAJUKU e MORISHITA, 2009) e (VAISHAMPAYAN, GUMASTE, *et al.*, 2009), além de *White Papers* de fabricantes de equipamentos, como Cisco, Fujitsu e Huawei, verifica-se que existe uma tendência, tanto no mundo acadêmico quanto no mundo comercial, de que as tecnologias vencedoras para as redes de transporte de nova geração são OTN em conjunto com *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS).

Devido a grande complexidade das tecnologias envolvidas, torna-se desejável um *framework* de simulação robusto, capaz de auxiliar usuários de diferentes perfis, desde pessoas em fase de aprendizado, buscando exemplos de como se comportam as redes, até pessoas que estejam desenvolvendo projetos de rede, ou protocolos que atuam na OTN. Dessa forma, para que isso seja possível, é necessário que o *framework* de simulação inclua vários aspectos das redes OTN,

como os planos de transporte, de controle e de gerência, além de alguns dos outros componentes que suportam ou auxiliam o funcionamento da rede ou auxiliam esses dois planos, como a descoberta automática e o canal de supervisão.

Conforme mencionado anteriormente, esta dissertação é uma continuidade de trabalhos e projetos já realizados e em andamento, então é natural a escolha pela mesma ferramenta de simulação que tem sido usada nos últimos anos, o simulador de eventos discretos OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed*), software livre e gratuito para uso em ambientes acadêmicos.

### 1.3 OBJETIVOS E RESULTADOS ESPERADOS

Esta dissertação tem como objetivo geral prover a extensão, adaptação e integração de trabalhos anteriores e em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Telecomunicações (LabTel) na UFES. Desses trabalhos, destacam-se: (FAVORETO, 2009), (TESSINARI, 2009), (FERRARI, 2009) e (FRIGINI, 2010). Esses trabalhos abordam, respectivamente, uma proposta de plano de controle GMPLS, a modelagem e implementação das camadas ópticas OTN, a funcionalidade de descoberta automática em redes OTN, e a implementação das camadas digitais OTN.

Para atingir este objetivo, faz-se necessário concluir com sucesso os seguintes objetivos específicos: (1) desenvolver uma arquitetura para o plano de gerência, capaz de tratar mensagens de descoberta automática, mensagens de controle, assim como informações sobre os alarmes G.798; (2) desenvolver uma arquitetura para o plano de controle que respeite as normas ITU-T, capaz de enviar mensagens de configuração, sinalização e roteamento para o plano de transporte, utilizando o plano de gerência como intermediário; (3) aprimorar os elementos do plano de transporte herdados de trabalhos citados, efetuando as devidas alterações que possibilitem e suportem as arquiteturas citadas; (4) implementar as soluções desenvolvidas no ambiente de simulação OMNeT++.

Como resultado desta dissertação, espera-se especificar novas arquiteturas, bem como um *framework* de simulação, que poderão ser utilizados em futuros trabalhos.

## 1.4 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação é desenvolvida de acordo com a seguinte metodologia:

- Estudo teórico sobre OTN, recomendações ITU-T, e RFCs (*Request for Comments*) IETF (*Internet Engineering Task Force*);
- Estudo de trabalhos relacionados;
- Desenvolvimento de uma proposta de arquitetura para o plano de controle e para o plano de gerência;
- Estudo conceitual sobre simulação, do simulador de eventos discretos OMNeT++, da linguagem de programação C++ e da linguagem de descrição NED;
- Implementação das arquiteturas, e de um protótipo de simulação, integrado com os trabalhos relacionados;
- Testes e validação de resultados.

## 1.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Este trabalho é uma extensão, adaptação e integração de trabalhos anteriores e em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa em telecomunicações do Laboratório de Telecomunicações (LabTel) na UFES. Desses, destacam-se como principais trabalhos: (FAVORETO, 2009), (TESSINARI, 2009), (FERRARI, 2009) e (FRIGINI, 2010), que são abordados na Seção 2.5.

## 1.6 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As contribuições originais trazidas por esta proposta são:

- Proposta de arquitetura para o plano de gerência;
- Proposta de arquitetura para o plano de controle;
- Nova implementação do plano de transporte no simulador OMNeT++;

- Implementação parcial das arquiteturas propostas, de forma integrada com os componentes do plano de transporte;
- Protótipo de simulação com diversas funcionalidades, dentre elas análise de falhas e propagação de alarmes pela rede.

## **1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

A dissertação apresenta, em seu Capítulo 2, um resumo abordando os principais aspectos teóricos necessários para o entendimento das redes ópticas de transporte. São abordados os principais componentes arquiteturais, a estruturação por camadas e os diferentes planos que definem a OTN. Ainda nesse mesmo capítulo são apresentados conceitos sobre simulação de redes ópticas, e o relacionamento desta dissertação com trabalhos previamente desenvolvidos.

No Capítulo 3 são apresentadas as duas arquiteturas propostas: uma para o plano de gerência e outra para o plano de controle. A proposta de arquitetura para plano de gerência é abordada na Seção 3.1 enquanto a arquitetura para o plano de controle na seção 3.2.

O Capítulo 4 aborda o simulador de eventos discretos OMNeT++ e seus principais conceitos, além dos aspectos práticos de implementação dos planos de transporte, gerência e controle.

No Capítulo 5, mais especificamente na Seção 5.1, são apresentados como os módulos e classes implementados são unidos para formar diferentes equipamentos ópticos, utilizados para montar topologias de rede. Já a Seção 5.2 apresenta três testes, como forma de validação desta dissertação.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar de forma sucinta as principais características das redes OTN, suas vantagens em relação às outras tecnologias, as recomendações que descrevem seu funcionamento, uma breve descrição da sua estrutura, e os equipamentos típicos que a compõe. Entretanto, não é objetivo deste capítulo servir como um guia teórico definitivo, nem repetir em demasia os assuntos já abordados em trabalhos anteriores pelo grupo de pesquisa em OTN do LabTel. Dessa forma, são abordados os conceitos mais importantes para o entendimento das propostas apresentadas nesta dissertação, e são deixadas referências para estudos mais detalhados.

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 2002), as redes ópticas podem ser divididas em duas gerações. Projetadas para serviços ponto a ponto e carregando um único sinal óptico por fibra, a primeira geração de redes ópticas era basicamente utilizada para transmissão e aumento da capacidade, tendo em vista que a fibra óptica é um meio que provê baixa taxa de erro de bits e alta capacidade de transmissão em comparação com outras tecnologias. Todas as operações de comutação e outras funções inteligentes eram realizadas eletronicamente, a partir de uma conversão O-E-O (Óptico-Elétrico-Óptico) em cada elemento de rede. Como exemplos dessa primeira geração podem ser citados as redes SONET/SDH, utilizadas praticamente em todos os países do mundo.

No início da década de 1980, a criação SONET/SDH foi baseada no cenário da época, onde tráfego das telecomunicações era predominantemente de voz. Esse cenário mudou durante as últimas décadas e a demanda por tráfego para internet e telefonia móvel tem crescido de forma assustadora. Até agora, essa demanda tem sido suprida por uma combinação do aperfeiçoamento de tecnologias de modulação, como o TDM (*Time Division Multiplexing*) e o WDM, e dos dispositivos eletrônicos

que compõem a rede. No entanto, conforme as redes evoluem, os limites físicos se tornam mais críticos.

Nesse contexto tem crescido a ideia de que as redes ópticas podem fornecer funções mais complexas do que apenas conexões ponto-a-ponto, incorporando equipamentos como os OADM (*Optical Add/Drop Multiplexer*), ROADM (*Reconfigurable Add/Drop Multiplexer*) e os OXC (*Optical CrossConnect*), que permitem operações de comutação e roteamento diretamente na camada óptica, assim como o monitoramento e gerenciamento da rede em diversos níveis. Essas redes, com essas novas funcionalidades, correspondem à segunda geração de redes ópticas.

## 2.2 REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE

De acordo com (INIEWSKI, MCCROSKY e MINOLI, 2008), OTN é uma tecnologia desenvolvida para ser uma evolução das redes de transporte de núcleo, combinando a tecnologia WDM, que permite a transmissão de múltiplos comprimentos de onda em uma única fibra óptica, com os benefícios da tecnologia SONET/SDH.

Uma rede OTN é composta por um conjunto de ONE (*Optical Network Element*), interconectados por *links* de fibras, capazes de prover as seguintes funcionalidades: transporte, multiplexação, roteamento, gerenciamento, supervisão e mecanismos de sobrevivência aos canais ópticos, que transportam os sinais cliente.

Na literatura diz-se que as seguintes características apresentam os principais aprimoramentos da OTN sobre as tecnologias precedentes:

- Escalabilidade aprimorada: a OTN define um esquema de multiplexação similar ao do SONET/SDH, porém transporta dados nativamente a taxas de 1.25Gbps, 2.5Gbps, 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps (em fase de padronização) com uma quantidade menor de *overhead*
- Transporte transparente do sinal cliente: alguns sinais clientes são encapsulados diretamente dentro da OTN, enquanto outros tráfegos de dados utilizam, por exemplo, o *Generic Framing Procedure* (GFP). Dessa forma a

OTN pode transportar qualquer forma de sinal digital, e por isso ser chamada de “empacotador” digital (*digital wrapper*). Essa transparência permite o transporte de uma grande quantidade de tipos de sinais clientes, entre eles: SONET/SDH, Ethernet, *Fiber Channel*, *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), *Frame Relay*, e IP. Esses sinais são transportados sem que haja alterações nas características intrínsecas do sinal original (formato, taxa de *bits* e *clock*).

- Mecanismo aprimorado de correção de erros (FEC – *Forward Error Correction*): O SONET/SDH já possui um mecanismo de FEC, porém utiliza alguns bytes do cabeçalho que não possuem uso definido para transportar a informação de FEC. A OTN possui um campo maior, permitindo alcançar distâncias maiores de transmissão sem regeneração, uma vez que o algoritmo é capaz de corrigir uma quantidade maior de erros de *bit*.
- Mais níveis de monitoramento TCM (*Tandem Connection Monitoring*): o cabeçalho OTN suporta até seis níveis de TCM independentes, tornando possível o monitoramento de vários segmentos de caminhos em múltiplos e distintos domínios administrativos.
- Operação, Administração, Manutenção e Aprovisionamento (OAM&P): a OTN provê funções de operação, administração, manutenção e aprovisionamento, herdadas do SONET/SDH e expandidas para as camadas elétricas da rede OTN.

Nas seções a seguir são apresentadas as principais recomendações que descrevem a tecnologia OTN, assim como sua arquitetura e modelagem de equipamentos tipicamente encontrados nas redes.

### 2.2.1 Recomendações OTN

Para prover todas as funcionalidades e características citadas na seção anterior, são necessárias padronizações (INIEWSKI, MCCROSKY e MINOLI, 2008). Dessa forma, a ITU-T criou uma série de Recomendações para descrever os diversos aspectos das redes OTN, como definição de parâmetros físicos dos lasers e fibras utilizadas, informações da descrição arquitetural OTN, formato de quadro, taxa de bits,



gerenciamento, controle, dentre outros. A seguir são apresentadas as principais recomendações relacionadas com esta dissertação.

ITU-T G.805 (*Generic Functional Architecture of Transport Networks*): descreve a arquitetura funcional genérica de uma rede de transporte do ponto de vista da capacidade de transferência da informação, isto é, a arquitetura funcional e estrutural das redes de transporte é descrita independente da tecnologia utilizada. Serve como base para outras recomendações que descrevem a arquitetura de outras tecnologias como ATM, SDH e OTN, (ITU-T, 2000). Para maiores informações e uma análise mais detalhada, consultar (BARCELOS, 2011).

ITU-T G.872 (*Architecture of Optical Transport Network*): define a arquitetura das redes ópticas de transporte usando as metodologias de modelagem descritas na ITU-T G.805. Nessa recomendação a rede OTN é estruturada em camadas e, para cada camada, há descrição de suas funcionalidades, do tipo de informação que nela trafega e das associações entre as camadas do tipo cliente/servidor. (ITU-T, 2001)

ITU-T G.709 (*Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*): define as interfaces OTN com base em uma hierarquia de multiplexação digital e óptica, especificando as taxas de bits, a estrutura dos frames, o formato dos cabeçalhos de cada camada e o formato para mapeamento de sinais clientes. É nessa recomendação que se define o funcionamento do FEC e do encapsulamento digital OTN. (ITU-T, 2009)

ITU-T G.798 (*Characteristics of Optical Transport Network Hierarchy Equipment Functional Blocks*): define uma série de blocos funcionais que permitem a modelagem dos elementos da rede OTN. Os blocos funcionais baseiam-se na hierarquia de camadas da recomendação ITU-T G.872 e nos esquemas de multiplexação apresentados na recomendação ITU-T G.709, descrevendo as funções de adaptação e de terminação de trilhas das camadas OTN. Nessa recomendação também é detalhado como funciona a correlação de alarmes e defeitos. (ITU-T, 2010), (SANTOS, 2009)

ITU-T G.874 (*Management Aspects of the Optical Transport Network Element*): aborda os aspectos do gerenciamento das Redes Ópticas de Transporte, onde são apresentadas a arquitetura, os equipamentos funcionais e requerimentos de

gerência OTN. Nessa recomendação, encontra-se a lista dos parâmetros referentes às disciplinas da gerência: Falha, Configuração, Desempenho, Contabilidade e Segurança para as Redes Ópticas de Transporte. (ITU-T, 2010)

ITU-T G.7714 (*Generalized Automatic Discovery for Transport Entities*): descreve o processo de descoberta automática das entidades de transporte, seus sub-processos e as interações básicas de modo independente de protocolos. (ITU-T, 2005), (FERRARI, 2009)

ITU-T G.8080 (*Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*): apresenta uma arquitetura de referência para o plano de controle de uma Rede Óptica de Transporte Comutada Automaticamente, descrevendo um conjunto de componentes do plano de controle para manipular os recursos do plano de transporte e provendo funcionalidades para criar, manter e terminar conexões. (ITU-T, 2006)

A lista completa de recomendações pode ser encontrada no site da ITU-T. (ITU-T)

### **2.2.2 Componentes Arquiteturais de uma rede de transporte genérica**

A recomendação ITU-T G.805 apresenta uma série de componentes arquiteturais, os quais são utilizados para modelar a arquitetura OTN. Para melhor entendimento desta dissertação, faz-se necessário entender alguns desses componentes e sua utilização na modelagem de uma rede de transporte.

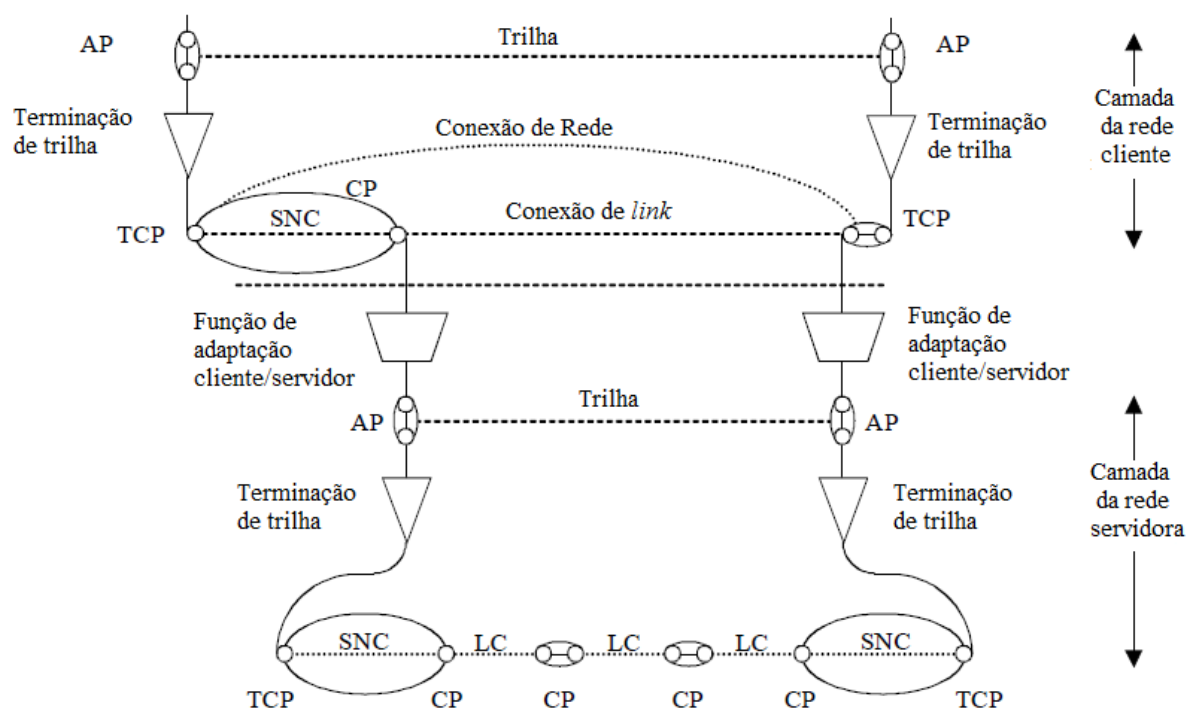
A arquitetura funcional genérica de uma rede de transporte é baseada em uma estrutura de *camadas*, no modelo cliente-servidor. O transporte das informações em uma camada é feito através das *trilhas* e *conexões*, onde as conexões são responsáveis por efetivamente transferir os dados, enquanto a trilha é responsável por monitorar as conexões no início e no fim do caminho. Sendo assim, uma trilha representa a transferência monitorada fim-a-fim das informações da camada e deve ser suportada por uma ou mais conexões que representam a transferência de informação. Por sua vez, esse monitoramento é realizado por uma *função de processamento* denominada *função de terminação de trilha*. Outra função de

processamento descrita pela recomendação ITU-T G.805 e utilizada nesta dissertação é a *função de adaptação*, que desempenha o papel de adequação da informação entre duas funções de terminação de trilha.

A ligação entre dois componentes da rede origina um ponto de referência (RP – *Reference Point*). São exemplos de pontos de referência: ponto de acesso (AP – *Acess Point*), ponto de conexão (CP – *Connection Point*), ponto de terminação de trilha (TCP – *Termination Connection Point*), etc.

Informações que trafegam pela rede, dependendo de sua origem ou destino, recebem diferentes nomes como: informações características, adaptadas ou informações de gerenciamento.

A Figura 2-1 a seguir mostra um exemplo de como esses componentes descritos são relacionados em uma modelagem funcional de uma rede de transporte. Além dos componentes citados, existem outros, como conexões de rede e de subrede, conexões de link, e, uma análise mais aprofundada sobre esses componentes e seu funcionamento, pode ser encontrada na própria recomendação ITU-T G.805 ou em (BARCELOS, 2011).



**Figura 2-1: Exemplo de modelagem funcional utilizando elementos da recomendação ITU-T G.805. (ITU-T, 2000)**

### 2.2.3 Estrutura de Camadas

Baseada na metodologia de modelagem descrita na recomendação ITU-T G.805, na recomendação ITU-T G.872 é descrita a arquitetura OTN, dividida em três camadas: OTS (*Optical Transmission Section*), OMS (*Optical Multiplex Section*) e OCh (*Optical Channel*), que juntas formam a chamada Hierarquia Óptica de Transporte (OTH - *Optical Transport Hierarchy*).

A camada OCh é responsável por fornecer um caminho óptico para transportar o sinal cliente pela rede OTN. Esse caminho existe entre duas terminações ópticas, uma na fonte, realizando a conversão do sinal elétrico para óptico e outra no final da trilha, realizando a conversão do sinal óptico para elétrico. Já a camada OMS é responsável por multiplexar/demultiplexar diversos comprimentos de onda, cada um transportando um canal óptico, em uma fibra. Por sua vez a camada OTS fornece um caminho óptico ponto-a-ponto entre dois ONEs. Para cada uma das camadas OCh, OMS e OTS há um cabeçalho próprio, com propósitos de gerenciamento, detecção de falhas e manutenção da qualidade dos sinais transmitidos. Como essas camadas são puramente ópticas, esses cabeçalhos são transportados em um canal separado do sinal de dados (*out-of-band*) chamado de canal de supervisão ou OSC (*Optical Supervisory Channel*). Esses cabeçalhos também são conhecidos como “não associados” (*Non-associated Overhead*).

Embora essas três camadas da parte óptica realizem as principais funcionalidades de transporte da OTN, existem casos em que é impossível projetar uma rede puramente óptica. Regeneradores 3R (*Reamplification, Reshaping and Retiming*) são muitas vezes necessários na transmissão de longas distâncias devido às restrições da camada óptica. Além disso, segundo a recomendação ITU-T G.872, nem todos os requerimentos de gerenciamento podem ser satisfeitos pelos mecanismos providos na camada óptica como, por exemplo, uma avaliação aprofundada da qualidade do sinal.

Por esses motivos a recomendação ITU-T G.872 define que a camada OCh contenha subcamadas, responsáveis da criação e gerenciamento do quadro OTN, elétrico, cujos cabeçalhos suportam os requerimentos de gerência formalizados pela recomendação ITU-T G.872. Essas subcamadas, que deste ponto em diante serão

tratadas de camadas, são: *Optical Channel Transport Unit* (OTU), *Optical Channel Data Unit* (ODU) e *Optical Channel Payload Unit* (OPU), que juntas formam a Hierarquia Digital de Transporte (DTH – *Digital Transport Hierarchy*).

Na camada OPU são realizadas adaptações necessárias para o transporte do sinal cliente pela rede OTN, como por exemplo, operações de justificação para ajuste da taxa de transmissão. A camada ODU, através de seu cabeçalho, provê as funcionalidades de multiplexação TDM, proteção, supervisão fim-a-fim do caminho, TCM, entre outras funcionalidades de monitoração da qualidade do sinal. Por sua vez a camada OTU que provê alinhamento de quadros, assim como monitoramento de seções e o FEC. Segundo a recomendação ITU-T G.709, uma estrutura de quadro OTN completa (OPU, ODU e OTU) é capaz de fornecer funcionalidades de OAM&P através das informações de seu cabeçalho. Cabe salientar que o cabeçalho das camadas OPU, ODU e OTU é chamado de “cabeçalho associado” (Associated Overhead) por ser enviado junto com os dados, no quadro OTN. A Figura 2-2 a seguir ilustra a estrutura em camadas OTN e o fluxo de informação entre as camadas.

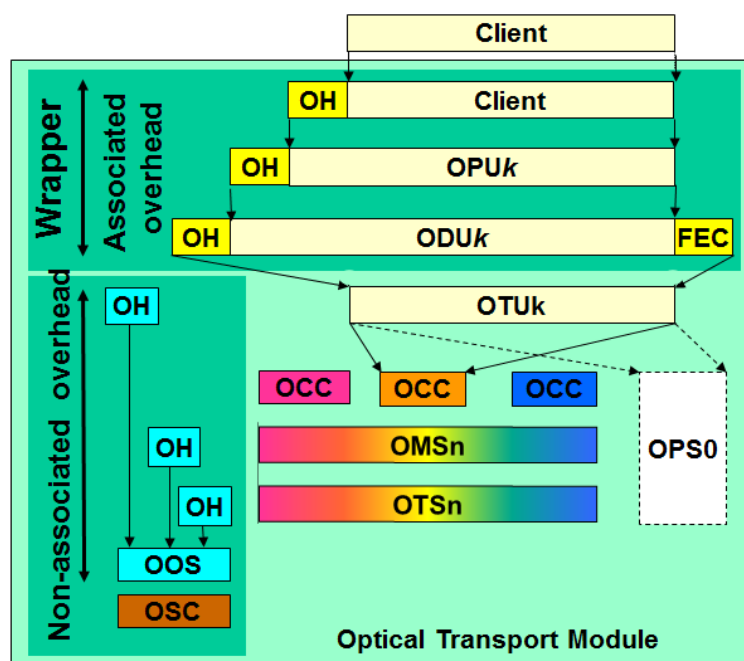


Figura 2-2: Fluxo de informação em uma rede OTN.

Analisando a Figura 2-2, verifica-se o uso do caractere “k” em frente ao nome das camadas digitais, representando as diferentes taxas de transmissão suportadas; e o uso do caractere “n” nas camadas ópticas, representando número de comprimentos de onda transportados. Esses dois caracteres estão relacionados com

o *Optical Transport Module-n* (OTM-n.m), a estrutura de informação utilizada pelas interfaces ópticas da OTN, na qual o “n” equivale ao “n” da Figura 2-2 e o “m” equivale ao “k” da mesma figura. Por exemplo, um OTM-16.2 significa que há dezesseis comprimentos de onda de 10Gbps, enquanto um OTM-0.1 significa que há um único comprimento de onda de 2,5Gbps.

#### 2.2.4 Equipamentos OTN

Embora as recomendações da ITU-T descrevam funcionalmente as redes ópticas de transportes, um ONE (*Optical Network Element*) é formado por equipamentos que desempenham as funções descritas nas normas. Na Figura 2-3 a seguir são mostrados os equipamentos que compõe um trecho de rede WDM, como multiplexadores, amplificadores, lasers e chaves ópticas.

Os lasers e os moduladores são responsáveis por realizar a conversão óptico/elétrico, transmitindo a informação desejada em um comprimento de onda específico, que por sua vez são então enviados a um multiplexador que “agrupa” os diferentes comprimentos de onda em uma única fibra. Os amplificadores ópticos (OA - *Optical Amplifier*) são utilizados para amplificar o sinal WDM. Por sua vez o módulo OADM é capaz de retirar um dos comprimentos de onda de entrada,  $\lambda_k$  no exemplo da Figura 2-3, e inserir outro sinal óptico com o mesmo comprimento de onda; enquanto os módulos DAa (*Amplifier-aided Dispersion Accommodation*) e PMDC (*Polarization Mode Dispersion Compensation*) são equipamentos utilizados para amenizar os efeitos de dispersão na fibra (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 2002).

Uma importante questão é exatamente como relacionar os equipamentos reais com os elementos arquiteturais descritos nas recomendações da ITU-T.

Uma possível abordagem consiste em analisar a funcionalidade do equipamento, verificando qual função de processamento, ou conjunto de funções, descrita na recomendação ITU-T G.798 é equivalente. Por exemplo, na Figura 2-3, o ONE amplificador de linha unidirecional tem como função principal amplificar o sinal óptico WDM de entrada, com exceção do canal de supervisão, que, por ser um elemento puramente óptico e não realizar funções de (de)multiplexação ou conversão O-E-O,

relativas às camadas OMS e OCh, respectivamente, dessa forma, diz-se que o amplificador de linha implementa apenas a camada OTS, conforme ilustra a Figura 2-4 a seguir, presente no Apêndice I da recomendação ITU-T G.872. Outros equipamentos são mostrados em (TESSINARI, 2009), (FAVORETO, 2009), além da própria recomendação ITU-T G.872.

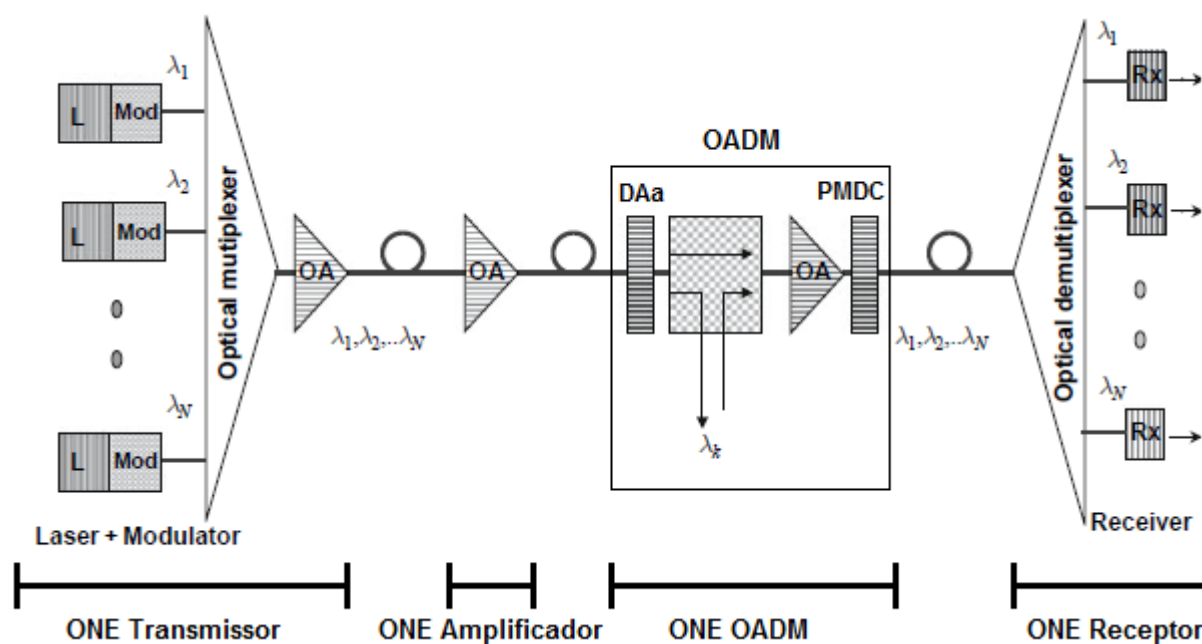


Figura 2-3: Exemplo de rede WDM. (KARTALOPOULOS, 2008)

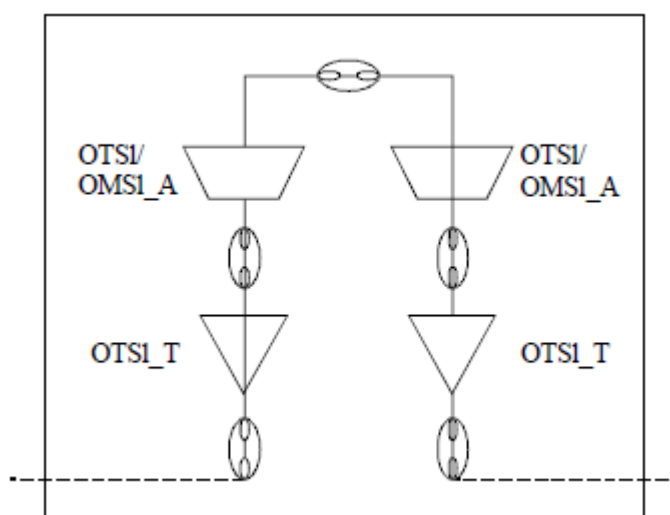


Figura 2-4: Amplificador de linha representado por funções de processamento. (ITU-T, 2001)

## 2.3 PLANOS DE TRANSPORTE, DE CONTROLE E DE GERÊNCIA

Segundo (FARREL e BRYSKIN, 2006), é interessante decompor os nós da rede em componentes funcionais, agrupando em um plano os componentes que se comunicam entre si para realizar uma tarefa em comum. Normalmente, os componentes funcionais de um sistema de telecomunicações podem ser agrupados em três planos distintos: plano de transporte, de gerência e de controle.

O plano de transporte, ou plano de dados, é o plano por onde trafega a carga útil, ou seja, os dados do cliente. É o conjunto de equipamentos que tem como função principal transportar fisicamente qualquer tipo de informação. Por sua vez, o plano de controle tem como função principal garantir que plano de transporte seja capaz de transportar os dados de maneira eficiente e inteligente, podendo ser responsável por realizar operações de configuração automática, alocação de recursos, roteamento em caso de falhas, e outras decisões, com nível parcial ou total de automação. Já o plano de gerência fornece uma interface homem-máquina com todos os demais planos, de forma que o administrador da rede possa tomar decisões que afetem a operação de todos os planos.

As informações que trafegam nos planos de controle e gerência trafegam pela DCN Rede de Comunicação de Dados (DCN – *Data Communications Network*), uma rede logicamente independente da rede que transporta os dados do cliente, mas que pode fisicamente compartilhar recursos com essa.

## 2.4 SIMULAÇÃO DE REDES ÓPTICAS

Em computação, simulação consiste em “imitar”, computacionalmente, um processo ou uma operação do mundo real. A simulação de redes ópticas é um processo muito utilizado para validar protocolos ou sistemas, já que a implementação física de uma rede teste, em geral, é muito custosa.

Segundo (JERUCHIM, BALABAN e SHANMUGAN, 2002), um *sistema de comunicação* (por exemplo, uma rede de comunicação global, uma comunicação sem fio entre dois dispositivos ou uma complexa rede OTN) pode ser dividido em uma



hierarquia com dois níveis de abstração. No nível mais alto estão as redes de comunicação, formadas por um conjunto de nós interconectados através *links* de comunicação. No nível mais baixos estão os componentes que formam os *links*, como (de)moduladores, circuitos digitais, amplificadores, (de)codificadores e outros componentes que realizam o tratamento do sinal que transporta a informação pelo *link*.

As técnicas de simulação utilizadas dependem do nível de abstração e do objetivo da simulação. Por exemplo, em uma rede OTN o nível de rede é composto pelos ONEs, os *links* de dados, os componentes internos dos ONEs, como por exemplo, a matriz de conexão de um OXC, ou o microprocessador que gera o quadro OTUk. Segundo (JERUCHIM, BALABAN e SHANMUGAN, 2002), nesse nível deve-se utilizar um simulador orientado a eventos, onde a simulação pode oferecer informações de desempenho do sistema, como a vazão (*throughput*) da rede ou a utilização dos *links*. No nível de *link* da OTN estão os lasers, os (de)moduladores, o sinal WDM e a própria fibra óptica. Nesse nível a simulação tem como objetivo validar o sistema de geração do sinal óptico, bem como o seu comportamento durante o trajeto pela fibra, a fim de estimar algumas características do *link*, como o nível de ruído ou a queda de potência do sinal óptico. Nesse caso, recomenda-se utilizar simuladores baseados em modelos matemáticos para gerar um sinal óptico com o comportamento mais próximo possível do real. As características obtidas sobre o *link* são repassadas para as simulações do nível de rede.

A simulação da OTN nesta dissertação corresponde ao nível de rede e é modelada no simulador de eventos discretos OMNET++. O objetivo da simulação é servir como base para a validação das propostas apresentadas nesta dissertação.

## 2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Esta dissertação tem como premissa prover a extensão, adaptação e integração de trabalhos anteriores e em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa na UFES. Desses, destacam-se como principais trabalhos: (FAVORETO, 2009), (TESSINARI, 2009), (FERRARI, 2009) e (FRIGINI, 2010).

Os primeiros esforços de implementação de um simulador de redes OTN são apresentados em (FAVORETO, 2009), cujo objetivo é relacionar as recomendações da ITU-T para redes OTN e as RFCs (*Request for Comments*) da IETF (*Internet Engineering Task Force*) relativas ao GMPLS a fim de obter uma solução consistente e genérica de plano de controle para as redes OTN. Para alcançar o objetivo é realizado um estudo de ambos os padrões OTN e GMPLS, identificando em que ponto há uma conexão entre eles, analisando como o GMPLS deve representar os recursos do plano de transporte e quais as extensões dos protocolos do GMPLS devem ser utilizadas para o estabelecimento de caminhos ópticos em uma rede OTN.

O foco principal é o plano de controle em si, a troca de mensagens via canal de serviço e dos protocolos do GMPLS, deixando de lado o plano de transporte. Para isso é utilizada uma implementação simplificada das camadas da hierarquia óptica OTN, as quais realizam o processamento dos sinais de dados (*payload*), mas não tratam o cabeçalho (*overhead*) das camadas ópticas, não possibilitando, por exemplo, simular falhas de fibra e equipamentos. Em (FAVORETO, 2009) são desenvolvidas modelagens de alguns equipamentos ópticos e do canal óptico DWDM (representando a fibra óptica). Tanto o processamento dos cabeçalhos quanto a correlação de alarmes e falhas são deixados como sugestões para trabalhos futuros.

Em (TESSINARI, 2009) essa primeira versão foi expandida com a modelagem mais abrangente da Hierarquia Óptica OTN, baseando-se na descrição funcional das camadas, tendo como referência a recomendação [ITU-T G.798]. Para cada camada foram implementadas suas funções de terminação de trilha e de adaptação, tanto para o lado de origem (*source*) quanto do lado de destino (*sink*). A modelagem foi realizada de forma a abranger tanto o processamento do sinal cliente (*payload*) quanto de cabeçalho (*overhead*). Além disso, foram modeladas informações de alarme e informações remotas (troçadas inter e intra camadas). Para a realização dos testes, dois equipamentos foram modelados utilizando-se as camadas criadas. O primeiro deles é um amplificador de linha bidirecional e o outro um host OTN capaz de enviar e receber informação em seis comprimentos de onda, cinco para dados e um para o canal de supervisão.

Essa primeira versão não aborda nenhum dos processos dependentes de entradas da gerência, nem é dada muita atenção à questão da temporização (dos quadros, taxa de bits, tempos de resposta, etc.). Outra importante limitação de escopo desse trabalho é quanto a Hierarquia Digital OTN, cuja implementação, juntamente com o desenvolvimento de um plano de gerência, são sugeridos como trabalhos futuros.

Em (FERRARI, 2009) é apresentado um estudo da funcionalidade de descoberta automática para redes ópticas de transporte, baseada nas recomendações ITU-T G.7714 e ITU-T G.7714.1. Nesse trabalho foram criadas as mensagens e os procedimentos necessários para que sejam descobertos equipamentos e conexões entre pontos distintos da rede.

O trabalho visa a exemplificação do processo de descoberta para redes OTN com a criação de um protótipo que realiza a troca de mensagens descritas nas recomendações e, a partir dos dados obtidos, verifica os links bidirecionais entre as terminações de uma camada de rede. Através do protótipo, é obtida uma representação gráfica da topologia, além de relatórios contendo o status dos links referentes às redes simuladas e a identificação das conexões incorretas existentes. Entretanto, a funcionalidade de descoberta automática é implementada de forma independente, até então sem nenhuma integração com os demais trabalhos desenvolvidos pelo grupo.

Por último, dando continuidade ao trabalho de (TESSINARI, 2009), em (FRIGINI, 2010) é modelada a Hierarquia Digital OTN, mas não são abordados problemas relacionados ao plano de gerência, nem problemas relacionados à temporização dos sinais. Nesse trabalho também não são tratadas falhas, nem correlação dos alarmes OTN.

Além dos trabalhos desenvolvidos ou em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa no LabTel, não foram encontradas na literatura referências de trabalhos com abordagem similar a desta dissertação, ou seja, simulação de redes OTN, recomendação ITU-T G.798, no OMNeT++.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Por mais extensa e complexa que uma recomendação da ITU-T ou uma RFC do IETF possam ser, existem alguns pontos que não são abordados pelas normas, que são deixados em aberto para implementações específicas dos desenvolvedores de hardware ou software, ou ainda, pontos deixados como objetivo de estudos futuros. Isso representa uma oportunidade para que novas arquiteturas e novos modelos sejam criados, além de possibilitar decisões sobre que implementações devem ser efetivadas.

Os trabalhos citados na Seção 2.5, apesar de desenvolvidos pelo mesmo grupo de pesquisa, passam uma ideia de independência uns com os outros, ideia essa verdadeira antes do desenvolvimento desta dissertação. Um dos principais objetivos é justamente unificar os trabalhos anteriormente desenvolvidos, adicionando novas funcionalidades às já existentes, além de modelar e implementar novos componentes à medida do necessário. Pode-se resumir o que é abordado nesta dissertação nos itens a seguir:

- Arquitetura de Plano de Gerência e integração com a descoberta automática;
- Arquitetura de Plano de Controle e integração com os Planos de Transporte e Gerência;
- Implementação de novas funcionalidades do Plano de Transporte.

Nas sessões seguintes são detalhadas as modelagens e arquiteturas de plano de controle e plano de gerência realizadas nesta dissertação, já as decisões de implementação e codificação realizadas são abordadas no Capítulo 4, juntamente com as novas funcionalidades do plano de transporte.

### 3.1 ARQUITETURA DE PLANO DE GERÊNCIA E INTEGRAÇÃO COM A DESCOBERTA AUTOMÁTICA

O primeiro desafio enfrentado nesta dissertação diz respeito à formulação de uma arquitetura para o plano de gerência e sua integração com a funcionalidade de descoberta automática, desenvolvida em (FERRARI, 2009).

Basicamente essa integração pode ser analisada sob dois pontos de vista distintos: a visão do Agente de Descoberta (DA – *Discovery Agent*) e a visão do plano de transporte. Nesta dissertação é adotada a visão do plano de transporte, dando ênfase aos processos da recomendação ITU-T G.798. Para maiores informações acerca das mensagens, máquinas de estado e processos relacionados à Descoberta Automática, verificar (FERRARI, 2009) ou as recomendações ITU-T G.7714 (ITU-T, 2005) e ITU-T G.7714.1 (ITU-T, 2010).

#### 3.1.1 Um pouco sobre a Descoberta Automática

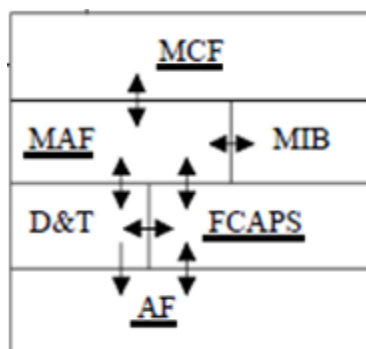
De acordo com (FERRARI, FRASSON e GARCIA, 2010), a descoberta automática se apresenta como o processo responsável pela identificação dos recursos da rede, obtenção da topologia e detecção de mudanças nessa topologia. Dois documentos da ITU-T normatizam esse processo: a recomendação ITU-T G.7714 (que apresenta a funcionalidade de descoberta automática para entidades de transporte, referindo-se aos processos funcionais e à troca de informações relacionadas ao recurso de Descoberta Automática no plano de transporte) e, como complemento, a recomendação ITU-T G.7714.1 (que define um protocolo para a descoberta das adjacências de camadas, ou seja, visa à descoberta da relação entre os pontos de terminação (TCP - *Termination Connection Points*) de uma mesma camada).

O processo de descoberta automática é iniciado com o agente de descoberta (DA), enviando uma série de mensagens contendo informações sobre os TCPs conectados a ele. Essas mensagens devem ser enviadas no campo TTI (*Trail Trace Identifier*) ou GCC (*General Communications Channel*) do cabeçalho dos quadros OTN. Atualmente, seguindo a estrutura de quadro definida na recomendação ITU-T

G.709 (ITU-T, 2009), apenas as camadas OTS, OTU e ODU possuem o campo TTI em seu cabeçalho (as camadas OTU e ODU também possuem o campo GCC), portanto, apenas essas três camadas podem ser descobertas de forma direta por essa técnica. Nas camadas ODU e OTU, o cabeçalho é inserido e enviado junto aos dados, devido à natureza digital dessas camadas, mas para a camada OTS, por ser uma camada puramente óptica, o cabeçalho é enviado separado dos dados, através do canal de supervisão.

### 3.1.2 Um pouco sobre o Plano de Gerência

O plano de gerência é o responsável por inserir as informações enviadas pelo DA nos cabeçalhos dos quadros OTN. A recomendação ITU-T G.874 (ITU-T, 2010) aborda a arquitetura do plano de gerência para redes ópticas de transporte. A Figura 3-1 a seguir mostra um modelo organizacional da gerência de um ONE (*Optical Network Element*). Nesse modelo o ONE é dividido da seguinte forma: MCF (*Message Communications Function*), MAF (*Management Application Function*), MIB (*Management Information Base*), D&T (*Date and Time*), FCAPS (*Fault Management, Configuration Management, Account Management, Performance Management and Security Management*) e AF (*Atomic Function*). A arquitetura apresentada nesta dissertação contempla algumas funcionalidades presentes nos componentes MAF, FCAPS e AF, sublinhadas na Figura 3-1. AF representa as funções atômicas contidas nas camadas OTN, ou seja, as terminações de trilha, funções de adaptação e funções de conexão, cujo funcionamento é especificado na recomendação ITU-T G.798. FCAPS é responsável pela interação da gerência com as funções atômicas. É a FCAPS que recebe/envia as mensagens de gerência (MI – *Management Information*) pelos MP (*Management Point*), originadas/destinadas às AFs. Já o componente MAF tem a função de converter as informações recebidas pela FCAPS em um formato que seja compreensível aos operadores da rede ou softwares de gerência externos, utilizando uma MIB na realização dessa tradução, além de ser responsável pela troca de informação com o plano de controle e com o DA.



**Figura 3-1: Modelo organizacional da gerência de um ONE.**

A recomendação ITU-T G.874 define as funcionalidades, arquitetura interna de seus componentes e a interface de comunicação com as camadas OTN. Entretanto, deixa muitas questões em aberto, tal como acontece na comunicação da FCAPS com as AFs, e como às AFs são identificadas e endereçadas. Tomando por base a hierarquia OTN de camadas, para cada canal óptico podem existir mais de doze AFs na hierarquia digital OTN, isso sem supor multiplexação de ODU; somando-se a essas doze AFs, somam-se oito funções atômicas na hierarquia óptica. Isso para cada par de fibras suportado (e em uso) no equipamento, sem contar que cada uma dessas AFs pode ter até doze tipos de sinais distintos. Em equipamentos que realizam funções de comutação óptica, como OXCs (*Optical Cross-connect*) ou ROADMs (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*), o número total de AFs a serem gerenciadas pode crescer muito rapidamente, podendo ultrapassar a casa das 20mil AFs e 100mil sinais, (valor calculado tomando por base o equipamento da Ciena CN 4200 ROADM, que trabalha nove pares de fibras, cada qual suportando até 192 canais). É relevante definir questões como: que tipo de arquitetura de comunicação utilizar? É melhor criar um único componente FCAPS, que se comunica com todas as AFs, ou é melhor dividir e criar sub-módulos FCAPS menores? Como realizar o endereçamento de cada uma dessas AFs? Como administrar essa quantidade de sinais?

Esses problemas são abordados na próxima seção, onde é mostrada a arquitetura para o plano de gerencia proposta nesta dissertação.

### 3.1.3 Proposta de arquitetura para o Plano de Gerência

A arquitetura proposta nesta dissertação segue o modelo organizacional mostrado na Figura 3-1, e, como já dito anteriormente, os blocos AF, FCAPS, MAF e MCF são contemplados. Vale ressaltar que não é objetivo desta dissertação implementar e modelar todas as funcionalidades da recomendação ITU-T G.874, tarefa essa deixada como sugestão para trabalhos futuros, e já em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa do qual o autor faz parte.

A Figura 3-2 a seguir apresenta um modelo organizacional do plano de gerência, onde cada gerente é uma instância do modelo da Figura 3-1. O modelo organizacional proposto é uma simplificação do modelo proposto nas recomendações ITU-T G.7710 e ITU-T G.874, onde o bloco FCAPS é dividido em múltiplos blocos (Gerentes Locais), um para cada par de fibras presente no ONE, as funções MAF e MCF são inseridas no bloco “Gerente NE”. As funções D&T e MIB não são deixadas contempladas neste trabalho.

A divisão do bloco FCAPS é adotada com o intuito de simplificar o endereçamento e de aproximar essa modelagem com a solução adotada por diferentes fabricantes de equipamentos OTN. Muitos fabricantes utilizam em seus equipamentos, uma placa que tem como objetivo supervisionar as demais placas, ou seja, para cada N transponders, K multiplexadores e J amplificadores, existem H placas que fazem a supervisão e verificação do estado dessas placas.

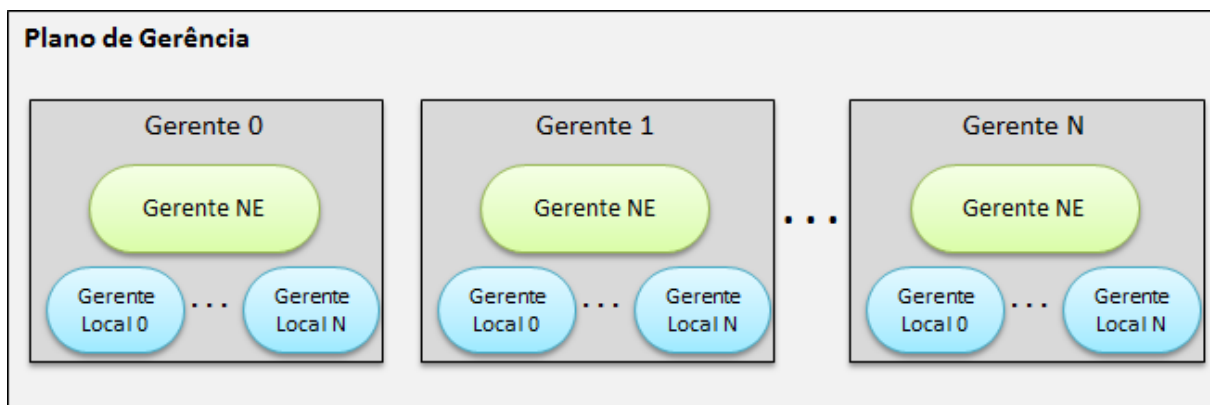
Na arquitetura proposta, para cada par de fibras conectado no ONE, existe uma instância da FCAPS, nomeada Gerente Local (*Local Manager*). Esses gerentes locais exercem duas das cinco funcionalidades presentes na FCAPS, mais especificamente a gerência de falhas (*fault management*) e gerência configuração (*configuration management*), já as gerências de contabilidade (*accounting*), de desempenho (*performance*) e segurança (*security*) não fazem parte do escopo desta dissertação.

O Gerente Local tem como principais funções:

- Criar um inventário de todas as AFs conectadas a ele;



- Comunicar-se com cada AF por meio dos MP (*Management Point*) e trocar MI (*Management Information*);
- Receber os sinais de alarme das AF, manter o estado atual de todos os alarmes (Gerência de Falhas);
- Reportar ao MAF sempre que ocorrer alguma alteração;
- Enviar para as AFs sinais com informações a serem inseridas em seus cabeçalhos, como TTI, e parâmetros de funcionamento das camadas, como o sinal MI\_TIMDetMo (*Management Information Trail trace Identifier Mismatch Detection Mode*), responsável por estabelecer o modo de funcionamento do processamento do TTI.



**Figura 3-2: Modelo de plano de gerência.**

O Gerente de NE (*NE Manager*) é outro importante componente da arquitetura de plano de gerência proposta nesta dissertação. O Gerente de NE representa uma fusão dos componentes MAF (*Management Application Functions*) e MCF (*Message Communications Function*) da Figura 3-1.

Esta dissertação não tem como objetivo modelar todas as funcionalidades presentes na recomendação ITU-T G.874 e, assim como acontece com a FCAPS, apenas as funcionalidades essenciais da MAF e da MCF são contempladas nesta primeira versão de arquitetura.

Basicamente o gerente de NE tem duas principais funções: comunicação com outros módulos e/ou planos e geração de *logs*. Atualmente, o gerente de NE é capaz de se comunicar com o agente de descoberta, com o plano de controle, e com um módulo de comunicação externa, ainda em fase de desenvolvimento pelo grupo de pesquisa, além de ser capaz de criar arquivos de *log*, contendo todas as alterações detectadas pelos gerentes locais do ONE.

Ao contrário dos gerentes locais, o gerente de NE é único no ONE, independentemente de quantos pares de fibras estejam conectados. Na arquitetura proposta, o gerente de NE possui um identificador único na rede, e seu identificador é utilizado como identificador do ONE como um todo. A Figura 3-3 ilustra o modelo da arquitetura proposta, mostrando a comunicação entre as AFs, organizadas em camadas e os gerentes locais, juntamente a comunicação entre os gerentes locais e o gerente de NE. É importante destacar que nessa arquitetura, toda a comunicação com o agente de descoberta, com elementos do plano de controle, e com outros componentes do plano de gerência é dada por meio do gerente de NE, através da ligação “Comunicação Externa”.

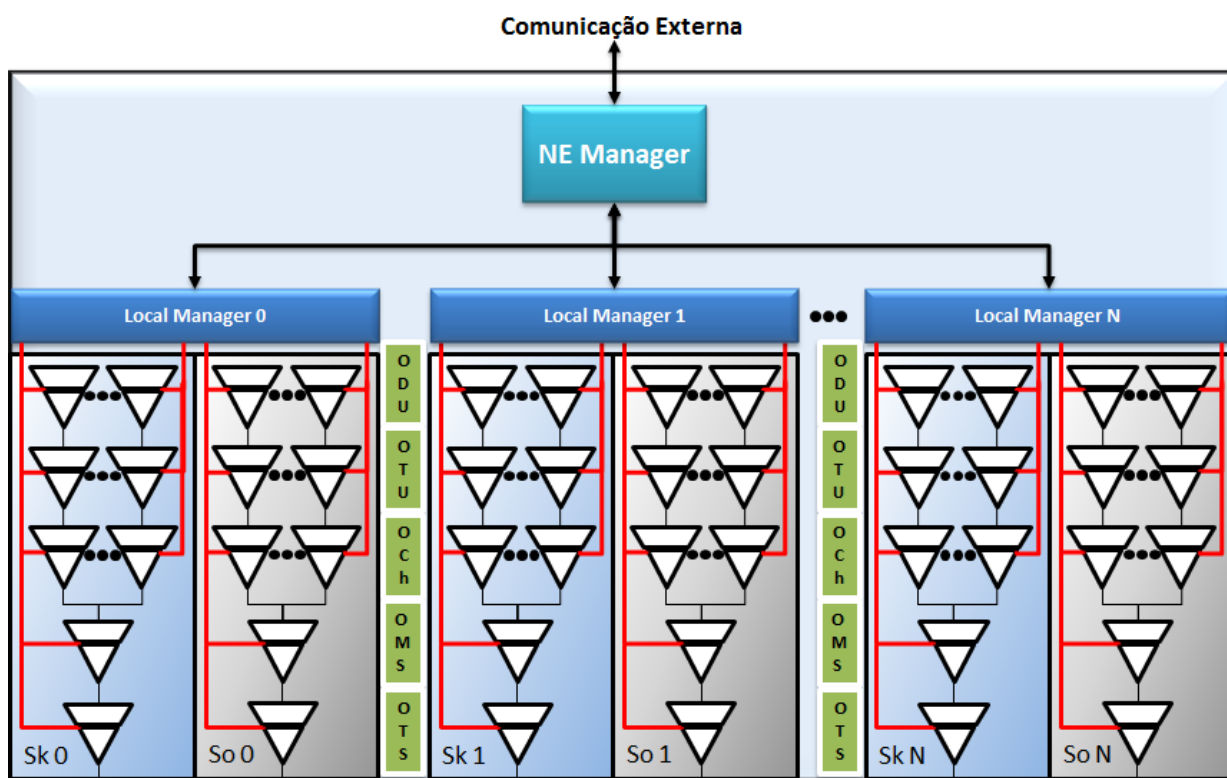


Figura 3-3: Proposta de arquitetura para plano de gerência.

Com o uso em conjunto dos gerentes locais e do gerente de NE, é possível endereçar cada uma das funções atômicas presentes no ONE. Pode-se também, inferir em qual fibra está conectado cada cliente da hierarquia digital, informação importantíssima em caso de falha na rede.

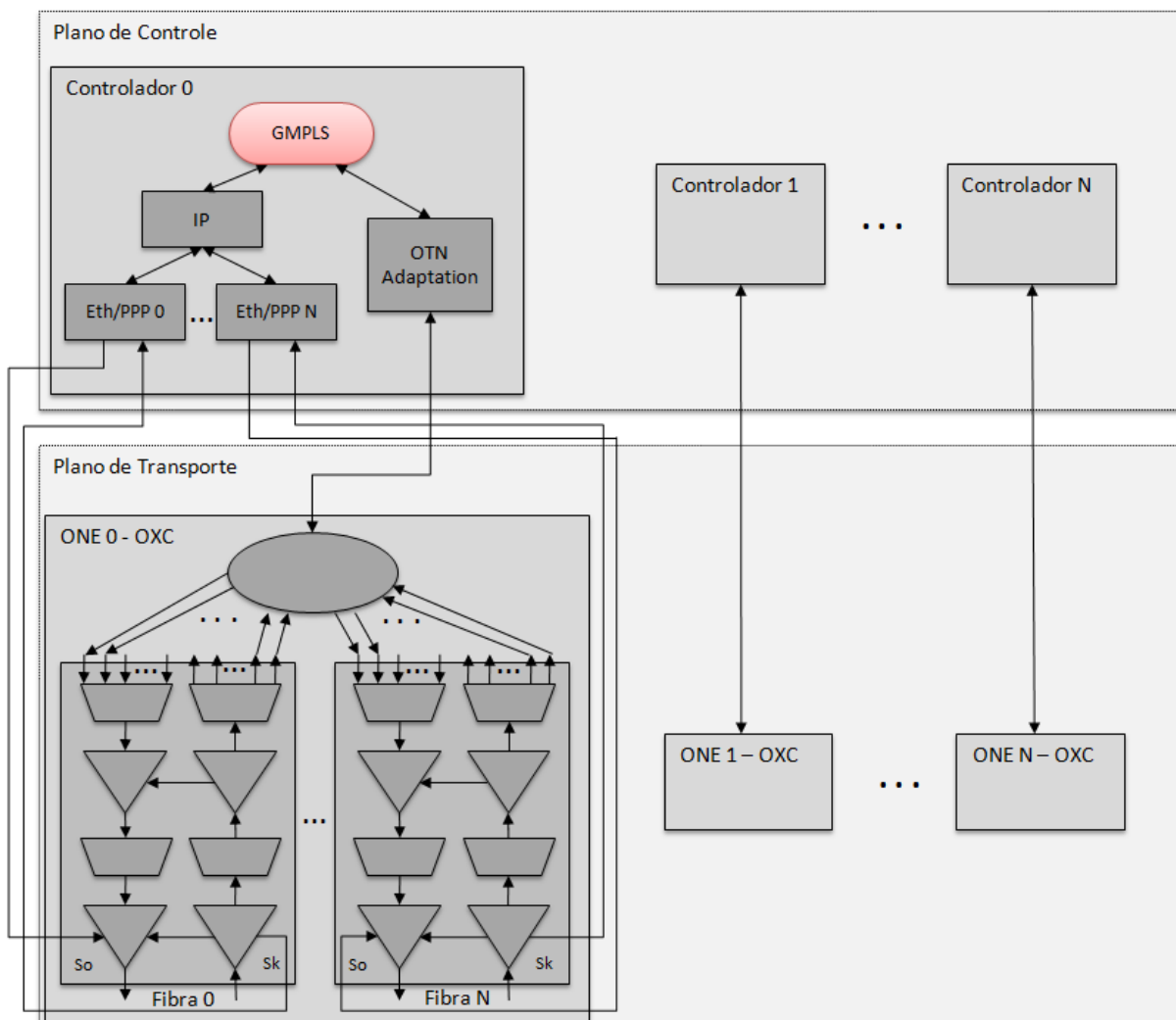
## **3.2 ARQUITETURA DE PLANO DE CONTROLE E INTEGRAÇÃO COM OS PLANOS DE TRANSPORTE E GERÊNCIA**

Na Seção 3.1 é apresentada a modelagem de uma arquitetura de plano de gerência e seu relacionamento com a funcionalidade de descoberta automática. Neste capítulo é abordada a atualização da arquitetura de plano de controle desenvolvida em trabalhos anteriores, de forma que essa nova arquitetura seja capaz de se comunicar e interagir com o plano de gerência desenvolvido nesta dissertação. Essa integração tem dois objetivos principais: integrar o plano de controle com o plano de gerência, atualizando a arquitetura prevista em (FAVORETO, 2009), e validar todas as alterações realizadas nos planos de transporte e gerência.

### **3.2.1 Primeira versão de plano de controle**

Em (FAVORETO, 2009) é proposta uma solução de plano de controle para redes OTN, baseada no GMPLS. Apesar de não estar explícita no trabalho, a arquitetura utilizada é similar a arquitetura mostrada na Figura 3-4. Nessa arquitetura, o plano de controle é composto por controladores GMPLS, capazes de interagir com a rede de transporte, tanto para efetuar alterações nas funções atômicas, por meio do componente “OTN *Adaptation*”, quanto para enviar mensagens de controle, blocos “IP” e “Eth/PPP”.

Como (FAVORETO, 2009) não contempla um plano de gerência, o plano de controle se comunica diretamente com o plano de transporte e não está totalmente compatível com as recomendações ITU-T G.798 e ITU-T G.874, as quais preveem que essa comunicação aconteça através dos MPs (*Management Point*), enviando e recebendo MIs (*Management Information*).



**Figura 3-4: Arquitetura para o plano de controle Proposta em (FAVORETO, 2009).**

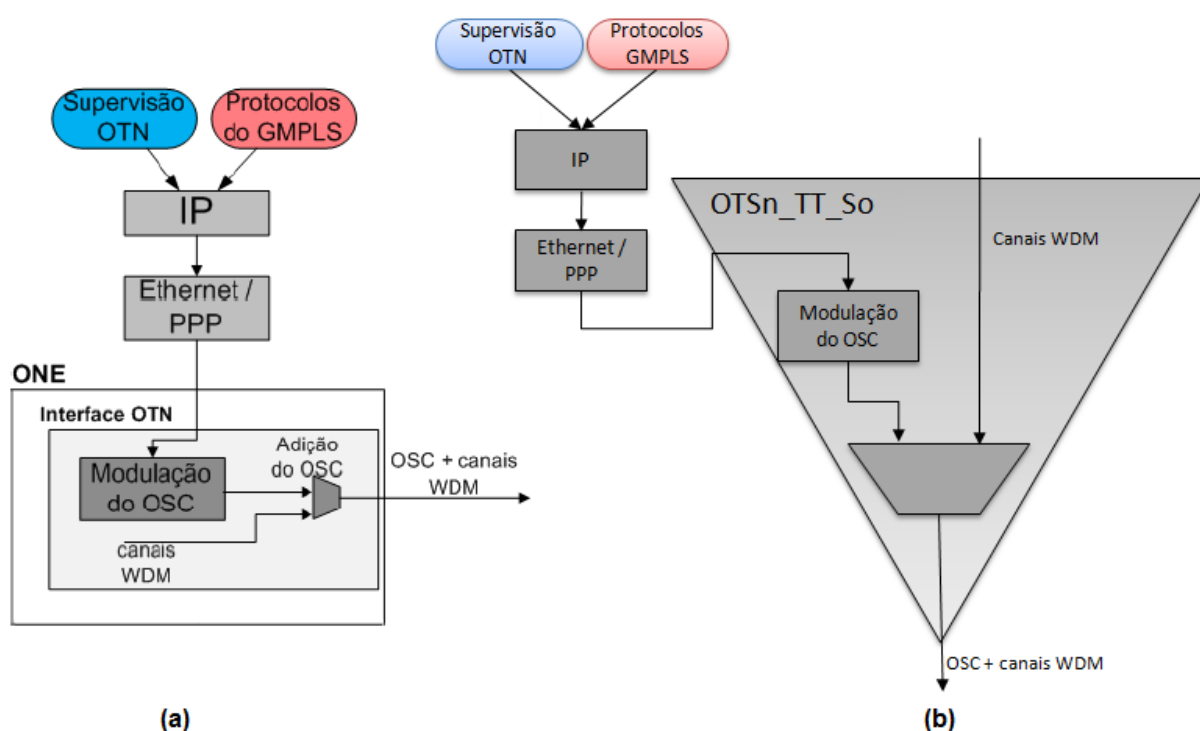
Nessa primeira versão de plano de controle, o controlador GMPLS consegue lidar apenas com a hierarquia óptica OTN, sendo capaz de estabelecer LSPs (*Label Switched Path*) no nível de OCh (*Optical Channel*), e, para que seja possível estabelecer, gerenciar e controlar esses LSPs, são necessárias informações relativas ao número de canais disponíveis, e suas respectivas capacidades.

Durante o estabelecimento uma OCh LSP, o plano de controle configura fisicamente os equipamentos da rede, capazes realizar comutação óptica, o OXCs (*Optical Cross-connect*) e/ou ROADMs (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*).

Cada um desses equipamentos possui uma matriz de conexão, cuja funcionalidade deve atender à recomendação ITU-T G.798, e, em termos de modelagem, essa matriz de conexão equivale à Função Atômica (AF) Função de Conexão (C – *Connection function*), mais especificamente a OCh\_C (*OCh Connection function*). A

recomendação ITU-T G.798 especifica que toda a troca de dados com a OCh\_C deva ser realizada através do ponto OCh\_C\_MP, utilizando o sinal MI\_MatrixControl para configuração, mas não especifica qual sinal deve ser utilizado na leitura das configurações da OCh\_C, sinal esse deixado como alvo para estudos futuros na atual recomendação ITU-T G.798 (ITU-T, 2010).

A segunda forma de interação do controlador GMPLS com o plano de transporte é o envio de mensagens de sinalização e roteamento pelo canal de controle GMPLS. Em (FAVORETO, 2009), é sugerido o uso do canal de supervisão (OSC – *Optical Supervisory Channel*) como canal de controle, conectando-o diretamente na terminação de trilha da camada OTS. A Figura 3-5 (a) extraída de (FAVORETO, 2009) demonstra a proposta: empacotar tanto as mensagens do GMPLS quanto os sinais de supervisão OTN, ou seja, os cabeçalhos das camadas ópticas contendo dentre outras informações, os estados dos alarmes ITU-T G.798; em (b) é mostrada a terminação de trilha OTSn\_TT\_So, responsável pela modulação do OSC, e sua multiplexação com os canais de dados.



**Figura 3-5: Proposta de uso do OSC. (a) Figura original (FAVORETO, 2009), (b) Visão da terminação de trilha OTSn\_TT\_So.**

Existem três questões nessa abordagem, duas delas conceituais e uma de caráter mais “prático”. Conceitualmente, essa arquitetura da Figura 3-5 (b) não está em total

conformidade com a recomendação ITU-T G.798, cuja versão atual (ITU-T, 2010), não disponibiliza nenhuma forma de realizar a comunicação entre o bloco “Ethernet/PPP” e o bloco “Modulação do OSC”, ou seja, não existe nenhum ponto de referência (*Reference Point*) entre esses elementos, tampouco sinais MI que possam ser realizados para tal função.

A segunda questão conceitual se refere ao acesso direto do plano de controle ao plano de transporte e, de acordo recomendação ITU-T G.874 (ITU-T, 2010), a comunicação entre os planos de controle e transporte deve ser realizada por intermédio do plano de gerência, através de MPs utilizando MIs. O seguinte trecho extraído e traduzido da recomendação ITU-T G.874 (ITU-T, 2010) justifica a afirmação deste parágrafo.

*“O fluxo de informação entre os pontos de referência MP que surge a partir do aprovisionamento e comunicação de dados é descrita em detalhes específicos para cada função atômica na [ITU-T G.798]. A informação listada na coluna input refere-se aos dados enviados pela OTN EMF às funções atômicas. A informação listada na coluna output refere-se aos relatórios repassados ao OTN EMF pelas funções atômicas.”*

Na citação apresentada, o termo OTN EMF se refere à (*OTN Equipment Management Function*), um componente do plano de gerência não abordado nesta dissertação. O ponto chave em questão é a afirmação de que as informações contidas nas tabelas da recomendação ITU-T G.798 (MP e MI) devem ser trocadas com a gerência. Após uma rápida análise, pode-se facilmente verificar que nessas mesmas tabelas não existem mensagens a serem trocadas (diretamente) com o plano de controle, confirmando que essa comunicação deva acontecer por intermédio de elementos do plano de gerência, única maneira capaz de trocar informações com o plano de transporte.

A terceira questão detectada diz respeito ao encapsulamento do cabeçalho OTN e dos protocolos GMPLS em IP. Para que esse encapsulamento seja possível, é necessário que haja uma fila nos blocos IP, da Figura 3-5 (b). Entretanto, algumas das informações enviadas nos cabeçalhos das camadas da Hierarquia Óptica OTN têm pré-requisitos temporais, como, por exemplo, os alarmes BDI-P e BDI-O da camada OTS, que devem ser propagados até seu destino em no máximo 50ms. Portanto, utilizando esse método, os alarmes previstos na recomendação ITU-T

G.798, sensíveis a atraso, estariam correndo o risco de não ter seus requisitos de tempo atendidos, já que estariam concorrendo pelo direito de transmissão no OSC com informações do plano de controle, que não possuem tal limitação.

Na próxima seção é discutida uma proposta de arquitetura que é sugerida como solução para esses problemas.

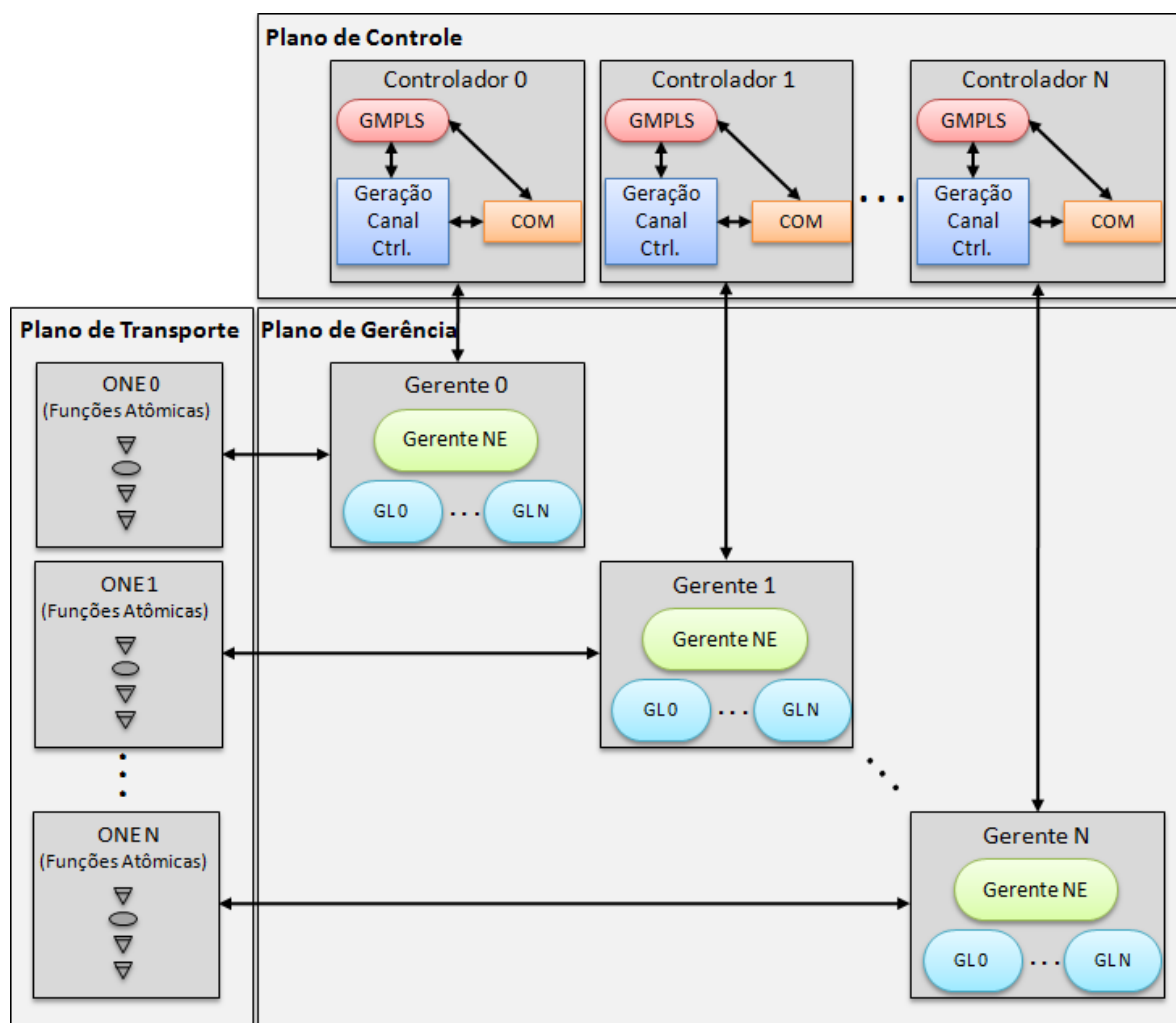
### **3.2.2 Proposta de arquitetura de plano de controle**

O conceito básico da arquitetura de plano de controle proposta nesta dissertação consiste em restringir o acesso ao plano de transporte, de forma que toda troca de informação com as Funções Atômicas sejam intermediadas pelo plano de gerência. Essa mudança se baseia nas recentes mudanças das recomendações ITU-T G.874 e ITU-T G.798, como discutido na seção anterior. Por não possuir acesso direto às Funções Atômicas do plano de transporte, os controladores podem ser desenvolvidos de maneira mais genérica, e independente, sem se preocupar com detalhes específicos de implementação de equipamentos.

O plano de controle é formado por controladores, compostos de três componentes básicos: GMPLS, gerador de canal de controle e um componente de comunicação com o plano de transporte. O módulo GMPLS contém os protocolos de sinalização e roteamento, como RSVP-TE e OSPF-TE, também contém a base de dados de engenharia de tráfego, TED. O gerador de canal de serviço é um módulo que implementa o protocolo IP, responsável por encapsular as mensagens geradas pelo módulo GMPLS em um pacote IP e posteriormente em PPP ou Ethernet. Por ultimo, é previsto um módulo de comunicação com o plano de gerência, cujo objetivo é encaminhar as mensagens do canal de controle, assim como enviar mensagens de configuração às OCh\_C. A Figura 3-6 ilustra a arquitetura proposta.

Esta nova arquitetura proposta atende aos pré-requisitos de não acessar diretamente o plano de transporte, e resolve as questões conceituais detectadas na arquitetura proposta em (FAVORETO, 2009), já que toda comunicação com o plano de transporte é realizada por meio do componente de comunicação, COM na Figura 3-6. Dessa forma, para enviar uma mensagem de configuração, ou requisitar

informações das funções de conexão OCh\_C, o bloco GMPLS envia uma mensagem ao bloco COM, que a encaminha ao plano de gerência. No plano de gerência, o bloco gerente de NE recebe essa mensagem, executa uma tradução na mesma, de forma a adequar essa requisição ao formato da MI correspondente, no caso MI\_MatrixControl. O sinal é enviado ao OCh\_C, que por sua vez executa o que lhe é requerido.



**Figura 3-6: Arquitetura proposta, realçando o relacionamento entre os diferentes planos.**

Para solucionar o problema do transporte das mensagens do canal de controle GMPLS, é proposto o uso do cabeçalho de comunicações gerais da gerência (COMMS OH – *General management communications overhead*) da hierarquia óptica OTN, que, de acordo com a recomendação ITU-T G.709 (ITU-T, 2009), que consiste em uma informação da gerência utilizada na comunicação entre diferentes elementos da rede (ONEs). A Figura 3-7 mostra a localização do campo COMMS OH no cabeçalho das camadas ópticas OTN.





Canal de Controle” e, logo após, o quadro é encaminhado a um gerente do plano de gerência pelo bloco “COM”. No módulo gerente, o bloco “Gerente de NE” converte essa mensagem para o formato próprio do campo COMMS, e encaminha ao Gerente Local responsável pela função de adaptação OMS/COMMS\_A desejada. A função de adaptação insere a informação no cabeçalho COMMS (“*General management communications*” na Figura 3-7), e na terminação de trilha OTS\_TT\_So o cabeçalho é modulado e multiplexado com os canais de dados WDM.

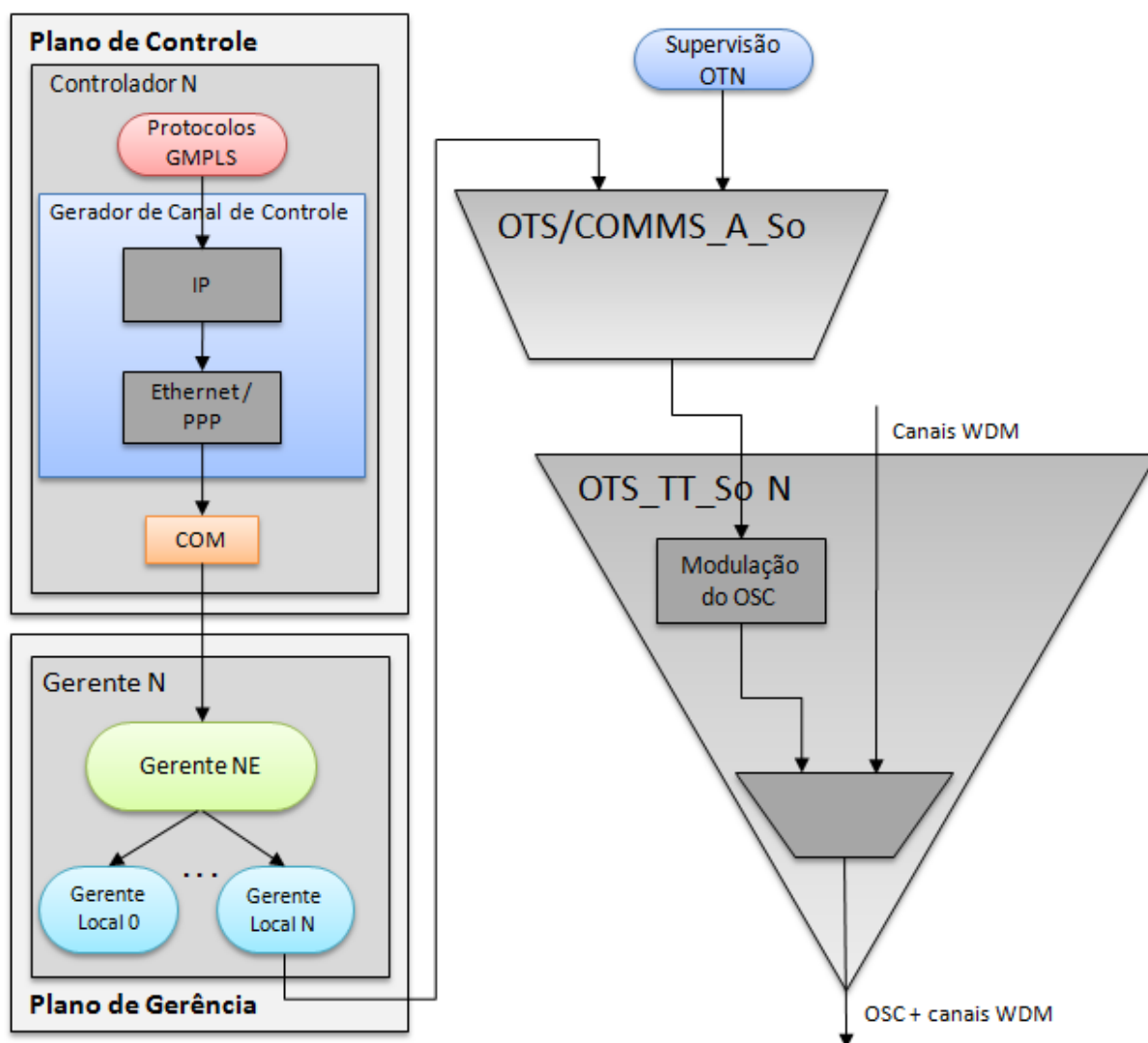


Figura 3-8: Modelo para inserção das mensagens de controle no OSC.

As recomendações mais recentes que tratam da COMMS OH, ITU-T G.709 (ITU-T, 2009), ITU-T G.798 (ITU-T, 2010) e ITU-T G.874 (ITU-T, 2010), não descrevem o formato, funcionamento ou tamanho desse campo, tampouco tratam das funções de adaptação que inserem o COMMS OH no cabeçalho das camadas da Hierarquia Óptica. Entretanto, para as camadas da Hierarquia Digital, são definidas as funções

de adaptação para as camadas OTU e ODU, e é proposto que sejam utilizados os campos GCC do cabeçalho OTU, e GCC1 e GCC2 do cabeçalho ODU, especificando inclusive, que o campo GCC1 seja usado para troca de mensagens de gerenciamento, e o campo GCC2 para troca de mensagens de sinalização, ou seja, controle. Essa indicação, de certa forma valida a proposta desta dissertação, já que para a camada ODU, é utilizado um campo do cabeçalho para enviar mensagens de controle, encapsuladas na COMMS OH.

### **3.3 CONCLUSÃO**

Neste capítulo são apresentadas duas propostas de arquitetura, uma para plano de gerência, e outra para o plano de controle.

A Seção 3.1 apresenta uma proposta arquitetura de plano de gerência, é mostrado como os gerentes interagem com os elementos do plano de transporte e com os agentes de descoberta, responsáveis pela funcionalidade de descoberta automática nas redes ópticas de transporte.

Já na Seção 3.2 é abordada a nova arquitetura para plano de controle, sua integração com o plano de gerência e seu relacionamento com o plano de transporte. É discutido como utilizar os sinais MIs, descritos na recomendação ITU-T G.798, na configuração de elementos do plano de transporte, e o cabeçalho COMMS, no transporte das mensagens de sinalização GMPLS pelo canal de supervisor OTN (OSC).

No Capítulo 4 a seguir é discutida a implementação das arquiteturas aqui apresentadas.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos relacionados à implementação das modelagens propostas no capítulo anterior. Primeiramente são abordados conceitos básicos do simulador OMNeT++, para em seguida entrar em detalhes dos códigos desenvolvidos.

### 4.1 O SIMULADOR OMNeT++

O simulador utilizado nesta dissertação é o simulador OMNeT++. Como esta dissertação consiste em uma continuação de trabalhos anteriores, é natural a escolha de continuar utilizando a mesma ferramenta, já que essa tem se mostrado bem robusta e vem atendendo ao seu propósito. Em (FAVORETO, 2009) é abordada a justificativa pela escolha do OMNeT++, assim como comparações do OMNeT++ com outras ferramentas de simulação.

OMNeT++ é definido por seu criador, Andrea Vargas, como um ambiente de simulação de eventos discretos cuja principal área de aplicação é a simulação de redes de comunicação, mas, devido a sua arquitetura genérica e flexível, está sendo utilizado com sucesso em outras áreas, como simulação de sistemas complexos de TI (Tecnologia de Informação), redes de filas e simulações de arquitetura de hardware. Possui uma arquitetura baseada em componentes (módulos), programados em C++, que podem ser utilizados na construção de componentes mais complexos, utilizando uma linguagem de alto nível, a linguagem NED (*Network Description*).

Os principais elementos do OMNeT++ são os módulos, os canais e as mensagens. Os módulos representam as entidades que se deseja simular, e são divididos em módulos simples e módulos compostos. Os módulos simples são atômicos, e possuem seu comportamento programado com a linguagem C++. No código de um módulo simples estão contidas as ações que o módulo realiza ao receber uma mensagem. Já um módulo composto é formado pelo agrupamento de módulos

simples e/ou outros módulos compostos, que podem ser conectados através de portas (*Gates*), Figura 4-1.

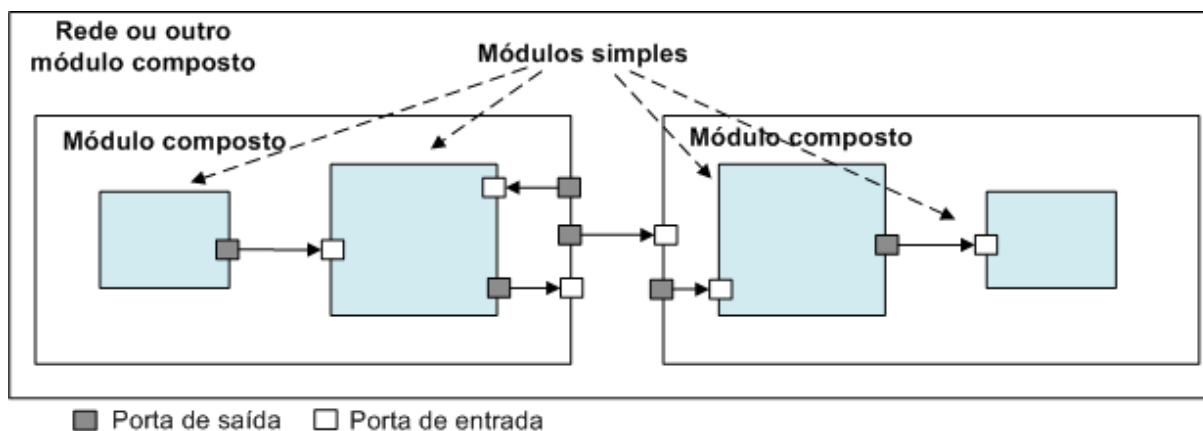


Figura 4-1: Relação hierárquica entre os módulos (Perez, 2005).

Portas são as interfaces de entrada e saída dos módulos e normalmente são conectadas por canais de conexão. Mensagens são objetos trocados entre os módulos através suas portas (*Gates*) e representam eventos no domínio simulado.

Por padrão o OMNeT++ disponibiliza três tipos de canais de conexão, *IdealChannel*, um canal ideal sem atraso de propagação ou de transmissão, *DelayChannel*, um canal apenas com atraso de propagação, e *DatarateChannel*, um canal com atrasos de propagação, atrasos de transmissão e taxa de erro de bit. Como nenhum desses canais padrão são capazes de representar o comportamento de uma fibra óptica, é necessário utilizar outro tipo de canal. Nesta dissertação é utilizado o canal *OpticalChannel*, capaz de lidar com representações de sinais que simulam diferentes comprimentos de onda, e outras características desejáveis em uma simulação de redes ópticas. Como nesta dissertação não é realizada nenhuma alteração significativa ao comportamento do *OpticalChannel*, (FAVORETO, 2009) continua sendo a melhor referência para se entender as modificações e maiores detalhes do funcionamento desse canal.

Mensagens são objetos trocados entre os módulos através de suas portas e representam eventos no domínio simulado. Uma mensagem pode representar um quadro (*frame*) OTN, um datagrama IP, ou até mesmo uma sinalização interna em um módulo simples, indicando a ocorrência de um determinado evento.

Por último, a conexão de todos esses elementos básicos do OMNeT++ é realizada em uma linguagem de descrição de redes (NED – *NEtwork Description Language*), criada especificamente para o simulador. Enquanto o comportamento dos módulos simples é descrito em C++, o funcionamento dos módulos compostos depende de como seus elementos internos estão conectados e como trabalham em conjunto, esse relacionamento é descrito em na linguagem NED. Da mesma forma, pela linguagem NED, são especificadas as topologias das redes simuladas, com isso o OMNeT++ provê uma boa separação entre descrição da topologia da rede e comportamento das entidades modeladas.

## 4.2 SIMULAÇÃO DE REDES OTN

Na Figura 4-2 é mostrada a estruturação por pastas do *framework* de simulação de redes OTN. Nas próximas seções são abordados os aspectos de implementação dos planos de transporte, de gerência e de controle. A modelagem de equipamentos OTN, bem como as redes, e testes são tratados no próximo capítulo.

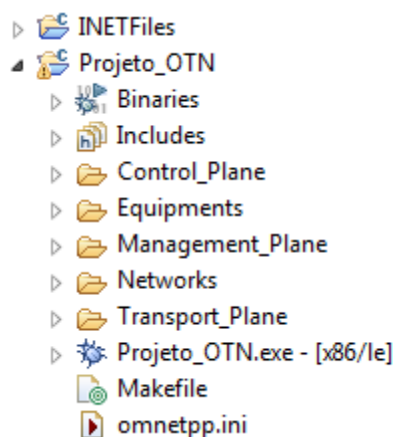


Figura 4-2: Estruturação por pastas do *framework* de simulação de redes OTN.

### 4.2.1 Plano de Transporte

O maior esforço de implementação realizado nesta dissertação é concentrado na atualização dos módulos e classes criadas em trabalhos anteriores para simular os elementos pertencentes ao plano de transporte OTN. Novas funcionalidades são adicionadas às classes já existentes, relacionadas com a correlação de alarmes e

defeitos, comunicação com plano de gerência, processamento de cabeçalhos, temporização, formato e encapsulamento de quadros OTN, sempre tomando por base as recomendações ITU-T G.709 e ITU-T G.798.

#### **4.2.1.1 Implementação das Funções Atômicas**

Esta dissertação dá prosseguimento à metodologia criada em (FAVORETO, 2009) e (TESSINARI, 2009), que consiste em implementar as funções atômicas (AF) das hierarquias óptica e digital OTN, e a partir dessas funções atômicas modelar equipamentos comumente encontrados em uma rede de transporte, como amplificadores, multiplexadores e demultiplexadores, transponders, módulos OXC, etc.

Para cada AF, primeiramente é realizado um estudo de seu funcionamento na recomendação ITU-T G.798, para então ser criado seu módulo simples em linguagem NED e sua classe em código C++.

O funcionamento básico de uma função atômica consiste em receber um ou mais sinais por meio de um ponto de referência, e realizar processamento e/ou adaptação desses sinais, para então enviá-los para a próxima AF. Existem quatro tipos possíveis de sinais tratados na recomendação: Informações Características (CI – *Characteristic Information*), Informações Adaptadas (AI – *Adapted Information*), Informações de Gerenciamento (MI – *Management Information*) e Informações Remotas (RI – *Remote Information*). Essas mensagens são enviadas/recebidas por pontos de referência específicos, por exemplo, MIs por Pontos de Gerenciamento (MP – *Management Point*) e RIs por Pontos Remotos (RP – *Remote Point*), etc; como tratado na recomendação ITU-T G.805.

Na recomendação ITU-T G.798 são apresentadas figuras representando todos os pontos de referência de uma AF, Figura 4-3 (a), seu relacionamento com a outra AF da mesma camada, formando o par receptor/emissor (Sk/So – *Sink/Source*), Figura 4-3 (b), e uma tabela contendo os sinais de entrada e saída como mostra a Tabela 4-1.

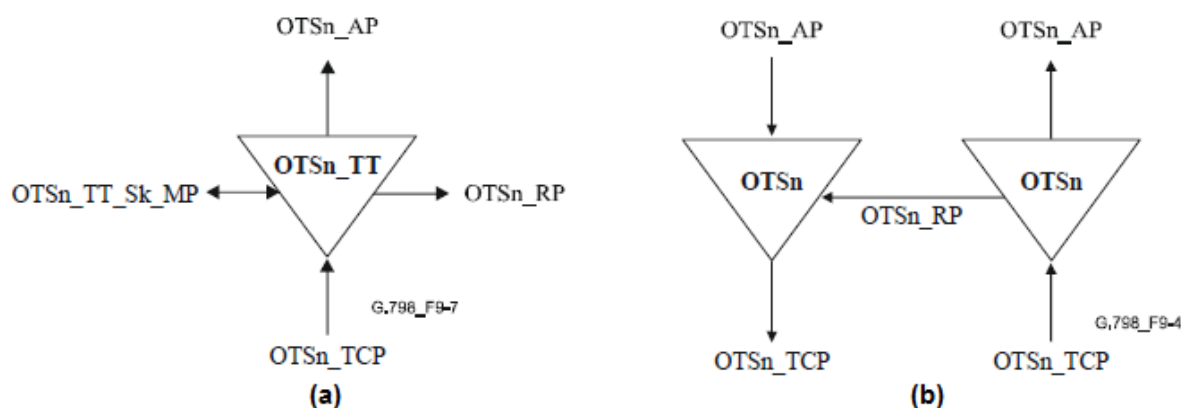


Figura 4-3: (a) Representação dos pontos de referência da OTSn\_TT\_Sk. (b) Terminação de trilha da camada OTS, emissor (*Source*) e receptor (*Sink*). (ITU-T, 2010).

Tabela 4-1: Sinais de entradas e saída da terminação de trilha OTSn\_TT\_Sk. (ITU-T, 2010)

Input(s)	Output(s)
<b>OTSn_TCP:</b> OTSn_CI  <b>OTSn_TT_Sk_MP:</b> OTSn_TT_Sk_MI_ExSAPI OTSn_TT_Sk_MI_ExDAPI OTSn_TT_Sk_MI_GetAcTI OTSn_TT_Sk_MI_TIMDetMo OTSn_TT_Sk_MI_TIMActDis OTSn_TT_Sk_MI_1second	<b>OTSn_AP:</b> OTSn_AI_PLD OTSn_AI_OH OTSn_AI_TSF-P OTSn_AI_TSF-O <b>OTSn_RP:</b> OTSn_RI_BDI-P OTSn_RI_BDI-O OTSn_RI_APR (Note) <b>OTSn_TT_Sk_MP:</b> OTSn_TT_Sk_MI_AcTI OTSn_TT_Sk_MI_cTIM OTSn_TT_Sk_MI_cBDI OTSn_TT_Sk_MI_cBDI-P OTSn_TT_Sk_MI_cBDI-O OTSn_TT_Sk_MI_cLOS-P OTSn_TT_Sk_MI_cLOS-O OTSn_TT_Sk_MI_cLOS OTSn_TT_Sk_MI_pN_DS-P OTSn_TT_Sk_MI_pN_DS-O OTSn_TT_Sk_MI_pF_DS-P OTSn_TT_Sk_MI_pF_DS-O
NOTE – If APR is required.	

De posse desses dados é possível criar o módulo simples da função atômica. O arquivo NED de um módulo simples contém informações sobre suas portas e seus parâmetros. Na Figura 4-4 a seguir são mostrados o código do arquivo NED (a) e a representação gráfica (b) da terminação de trilha OTSn\_TT\_Sk. No código são declaradas as portas (*gates*) do módulo simples implementado cOTSn\_TT\_Sk, seguindo a nomenclatura presente na recomendação ITU-T G.798, além de



parâmetros utilizados na simulação, como o parâmetro debug, por exemplo. Observa-se que a orientação das portas (entrada, saída) respeita a Tabela 4-1.

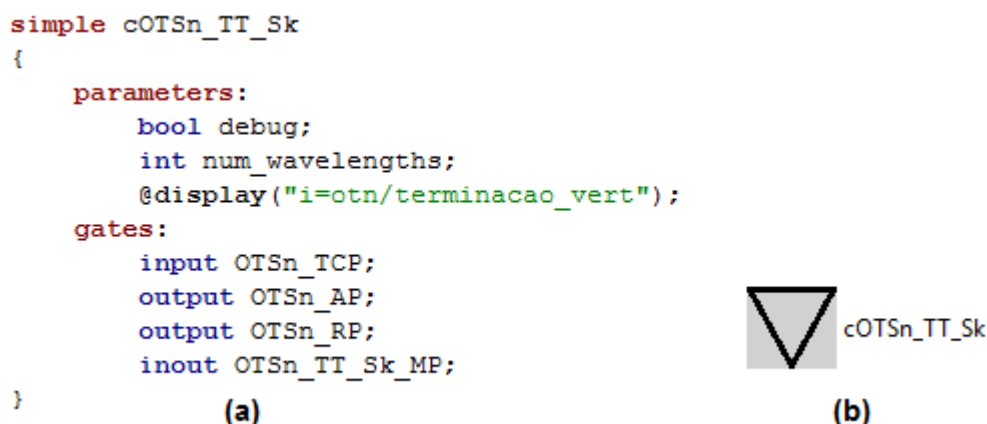


Figura 4-4: Código na Linguagem NED (a) e representação gráfica (b) da AF OTSn\_TT\_Sk.

A recomendação ITU-T G.798 descreve o funcionamento desses processos, incluindo suas entradas e saídas, e expressões lógicas de como essas entradas e saídas se relacionam. A Figura 4-5 a seguir ilustra os processos existentes na terminação de trilha OTSn\_TT\_Sk. Cada bloco (“*Consequent actions*”, “*Process TTI*”, etc.) representa um dos processos da terminação de trilha OTSn\_TT\_Sk, e o prefixo dos sinais indica que tipo de sinal é esse (AI, CI, RI ou MI).

Cada classe de função atômica implementada recebe o nome correspondente na recomendação acrescido da letra c. No exemplo usado, a AF OTSn\_TT\_Sk é implementada na classe cOTSn\_TT\_Sk, dessa forma mantém uma relação simples entre as classes e sua descrição na recomendação ITU-T G.798, o que facilita eventuais consultas na recomendação. Cada classe possui métodos representando os processos da AF, e atributos representando os sinais internos. Todos os processos da Figura 4-5 são implementados, com exceção do processo “*performance monitoring*”. Optou-se por não implementar tal processo dado seu relacionamento com a Gerência de Desempenho, não abordada nesta dissertação. A Figura I-1, Apêndice I, mostra a declaração da classe cOTSn\_TT\_Sk, com seus métodos e seus atributos.

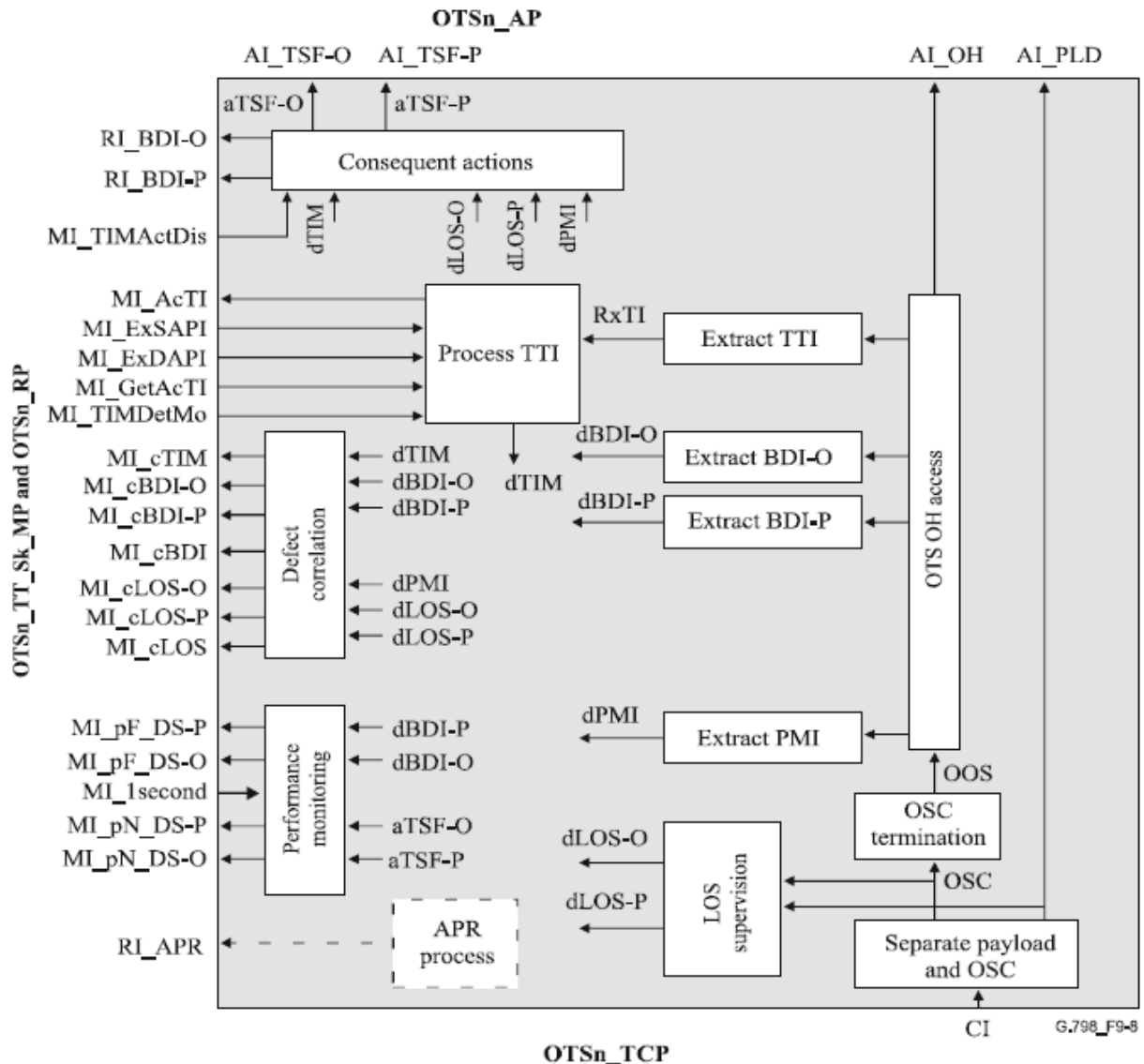


Figura 4-5: Processos da OTSn\_TT\_Sk. (ITU-T, 2010)

Além da terminação de trilha OTSn\_TT\_Sk, nesta dissertação são implementadas outras dezenove funções atômicas, totalizando vinte classes e seus respectivos módulos simples, abrangendo toda a hierarquia OTN, composta por OTS, OMS, OCh, OTU, ODU e suas adaptações. A Figura 4-6 a seguir mostra os arquivos fonte relacionados com a implementação dos diferentes componentes do plano de transporte. As classes *cAmplifier* e *cOpticalChannel* contidas na pasta *Auxiliary* são resultado de (FAVORETO, 2009), e permanecem inalteradas na presente dissertação.

Apenas a título de esclarecimento, apesar de em (TESSINARI, 2009) e em (FRIGINI, 2010) uma primeira versão das classes das funções atômicas da recomendação ITU-T G.798 ser implementada, diz-se que essas funções atômicas são

implementadas nesta dissertação pelo fato de que todas as classes, sem exceção, terem sido reescritas praticamente do zero, alterando diversas questões de implementação, como a estrutura interna das classes, seus métodos, organização interna dos sinais e de portas dos módulos simples, além de questões de otimização.

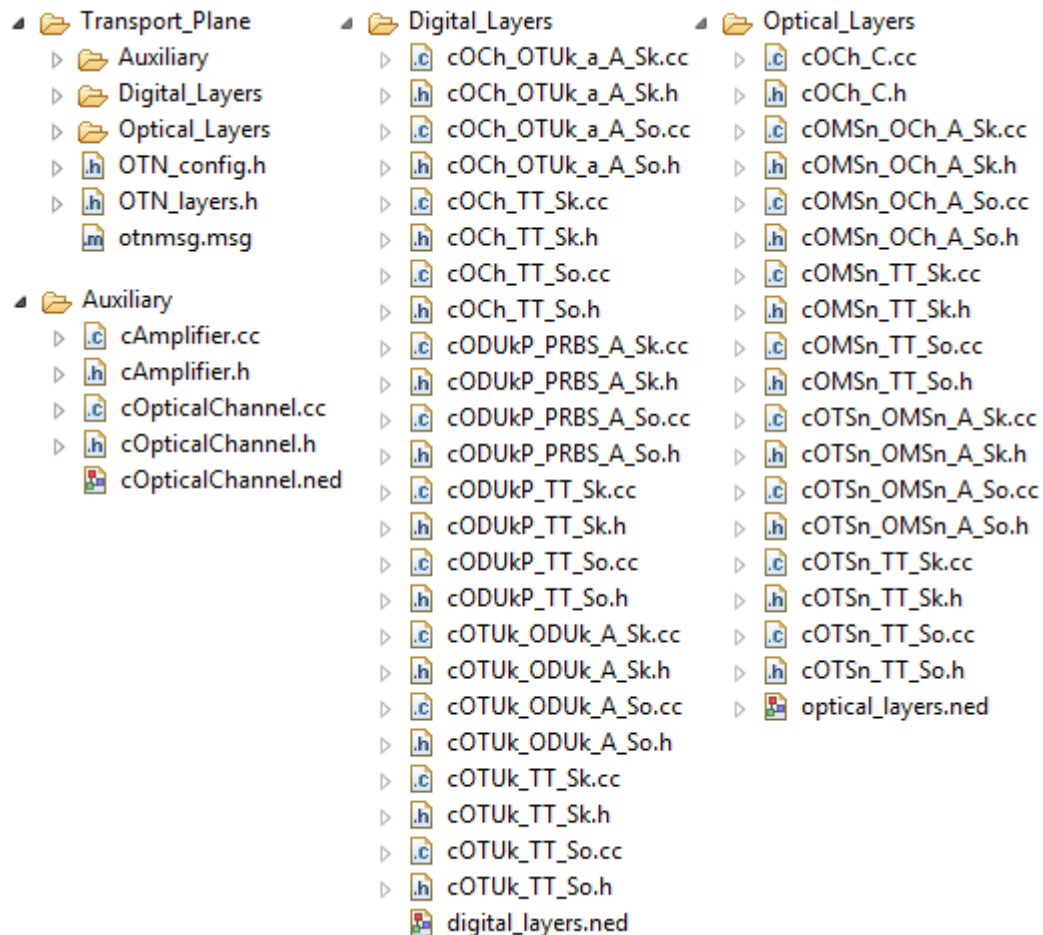


Figura 4-6: Organização dos arquivos relacionados com o plano de transporte.

#### 4.2.1.2 Mensagens do Plano de Transporte

Na simulação desenvolvida nesta dissertação, as informações transmitidas na rede são representadas por classes de mensagens. São criadas classes representando sinais elétricos ou sinais ópticos: o frame OTN, sinais cliente e de teste e alarmes, ou seja, todos os diferentes sinais previstos nas recomendações ITU-T G.798 e ITU-T G.709.

Para se definir uma ou mais mensagens é necessário criar um arquivo com extensão .msg, para que a partir desse arquivo o OMNeT++ gere uma classe e seus devidos arquivos .cc e .h. Em um arquivo .msg é possível criar classes de mensagem personalizadas, com novos parâmetros.

De trabalhos anteriores, a classe OTNMsg criada em (FAVORETO, 2009) é a única classe utilizada, todas as demais classes de mensagem apresentadas a seguir são resultados da proposta apresentada nesta dissertação. Cada mensagem OTNMsg representa um sinal óptico com comprimento de onda específico em uma fibra óptica. A mensagem possui os seguintes parâmetros: comprimento de onda, potência, relação sinal ruído, e tamanho. Além da mensagem OTNMsg, são definidas as seguintes classes: ClientMsg, OPUMsg, ODUMsg e OTUMsg, relacionadas com os sinais clientes e quadros da Hierarquia Digital OTN, OChOHMsg, OHMsg e OOSMsg, relacionadas com os cabeçalhos da Hierarquia Óptica e canal de supervisão, e a SIGNALMsg, classe essa usada na simulação dos alarmes e troca de informação entre camadas e equipamentos distintos. Na Figura I-2, Apêndice I, são resumidos todos os parâmetros das classes de mensagem criadas.

Na API (*Application Programming Interface*) padrão do OMNeT++, está disponível a função *encapsulate()*, a qual permite o encapsulamento de mensagens, e, dessa forma, é possível simular o processo de formação de quadros OTN, como mostra a Figura 2-2, ou seja, uma mensagem representando um sinal cliente é encapsulada como *payload* de uma mensagem OPU, que por sua vez é encapsulada em uma mensagem ODU, encapsulada em uma OTU. As mensagens OTUMsg contém um quadro OTN completo, que ao passar pelas funções atômicas da Hierarquia Óptica, é encapsulada em uma OTNMsg, têm seu comprimento de onda e nível de potência configurados e por fim é enviada pelo canal óptico, que representa uma fibra.

Para as mensagens de cabeçalho a mesma lógica se aplica, mensagens OChOHMsg são encapsuladas em uma OHMsg, que por sua vez forma a OOSMsg, que é modulada em uma OTNMsg para ser transmitida. A Figura 4-7 a seguir mostra a mensagem OTN e seus parâmetros, enquanto a Figura 4-8 mostra a mesma mensagem, com enfoque nos encapsulamentos realizados na simulação para representar o descrito relacionamento em funcionamento.

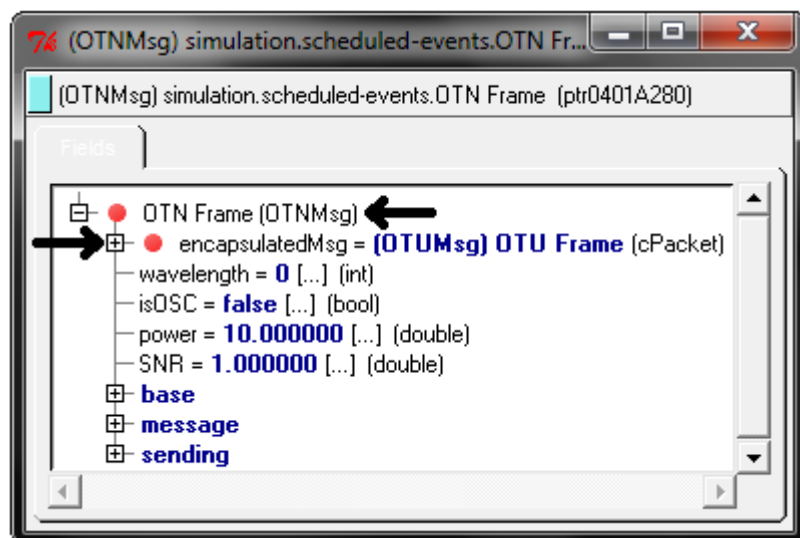


Figura 4-7: Mensagem representando um sinal óptico (OTNMsg).

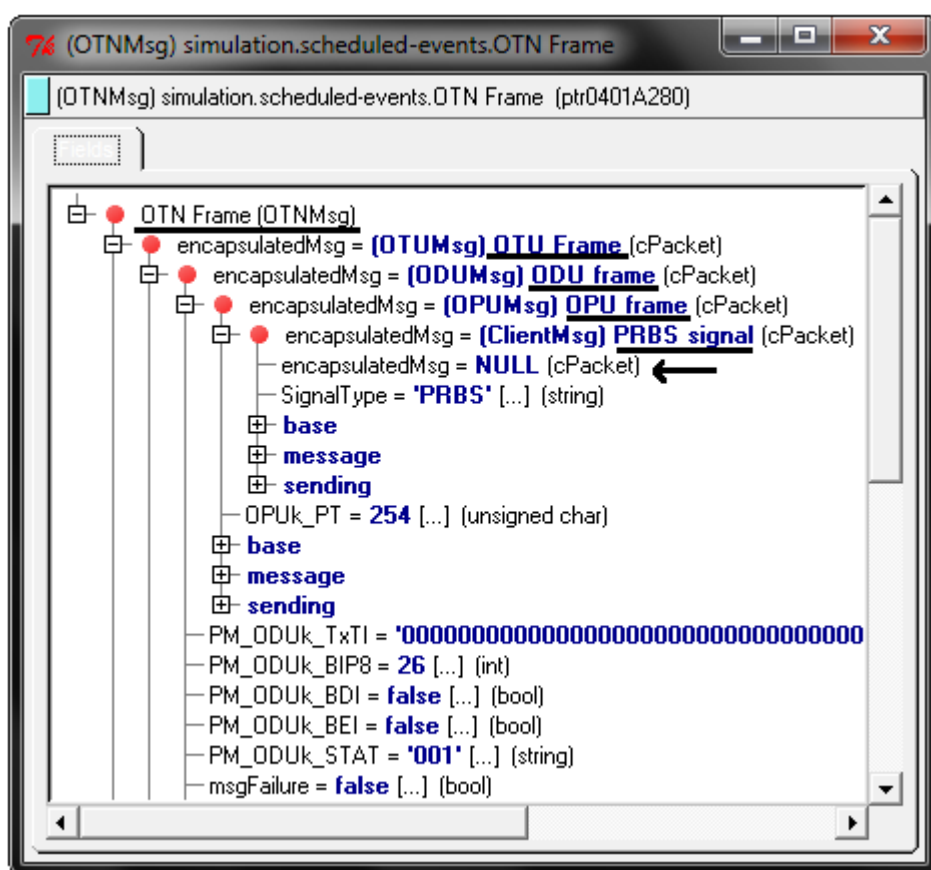


Figura 4-8: OTNMsg com ênfase nas mensagens encapsuladas.

#### 4.2.1.3 Gerador de Tráfego

Para que seja possível executar simulações é necessário que haja mensagens trafegando no sistema e para criar essas mensagens é necessário utilizar geradores

de tráfego, responsáveis por gerar os sinais clientes e de testes a serem processados pelas funções atômicas.

Na atual versão da simulação o módulo simples ODUk/PRBS\_A\_So é responsável por gerar a mensagens na rede. É possível gerar tráfego com taxa constante à 2,5Gbps, 10Gbps, 40Gbps e 100Gbps, equivalente à ODU1, ODU2, ODU3 e ODU4. Para determinar qual a taxa, basta mudar o parâmetro “*bitrate*” do módulo simples.

O parâmetro “*bitrate*” é relacionado com o período transmissão de um quadro, seguindo a Tabela 4-2 extraída da recomendação ITU-T G.709. Esses períodos são armazenados no arquivo de configuração OTN\_config.h, que contém além dos períodos, informações diversas como códigos de “*payload*”, de campos no cabeçalho, erros e até palavras de alinhamento. A Figura I-3, Apêndice I, mostra um trecho desse arquivo.

**Tabela 4-2: Período dos quadros OPU/ODU e OTU. (ITU-T, 2009).**

OTU/ODU/OPU type	Period (Note)
ODU0/OPU0	98.354 $\mu$ s
OTU1/ODU1/OPU1/OPU1-Xv	48.971 $\mu$ s
OTU2/ODU2/OPU2/OPU2-Xv	12.191 $\mu$ s
OTU3/ODU3/OPU3/OPU3-Xv	3.035 $\mu$ s
OTU4/ODU4/OPU4	1.168 $\mu$ s
ODU2e/OPU2e	11.767 $\mu$ s
ODUflex/OPUflex	CBR client signals: 121856/client_signal_bit_rate
	GFP-F mapped client signals: 122368/ODUflex_bit_rate
NOTE – The period is an approximated value, rounded to 3 decimal places.	

Seguindo esse método é possível criar geradores de sinais diversos, bastando incluir o período de transmissão de quadro no arquivo de configuração e ajustar o tamanho do quadro enviado. A título de exemplo, no futuro pode ser interessante adicionar a geração de quadros STM-64, e, para isso, basta adicionar o período de 125 $\mu$ s no arquivo de configuração e criar mensagens com 155520 bytes.

Na próxima seção é abordada a implementação dos elementos do plano de gerência.

## 4.2.2 Plano de Gerência

Conforme descrito na Seção 3.1.3, a arquitetura de plano de gerência proposta nesta dissertação é baseada em dois elementos fundamentais: o gerente local e o gerente de NE. Nesta seção é descrita a implementação do gerente local, como é realizada a comunicação com as funções atômicas do plano de transporte e com o gerente de NE, além de explicitar a estrutura das mensagens utilizadas nessa comunicação. A implementação do gerente de NE, assim como a implementação dos módulos de descoberta automática, não são abordadas nesta dissertação. Foram desenvolvidas e implementadas em outra dissertação vinculada ao Grupo de Pesquisa do LabTel, ainda não apresentada no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica. Para os testes realizados nesta dissertação, é utilizada a versão beta dos módulos “gerente de NE” e “descoberta automática”. A Figura 4-9 mostra os arquivos relacionados com a simulação do plano de gerência.

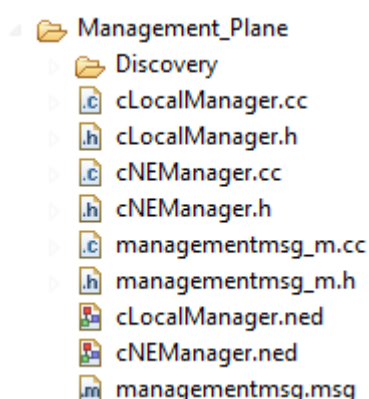


Figura 4-9: Organização dos arquivos relacionados com o plano de gerência.

### 4.2.2.1 cLocalManager

Como mencionado na Seção 3.1.3, o gerente local (GL) é o elemento do plano de gerência responsável pela comunicação entre as funções atômicas do plano de transporte e o Gerente do NE. Na arquitetura proposta, e mostrada na Figura 3-3, é proposto o uso de um Gerente Local para cada par de fibras conectada no ONE (*Optical Network Element*), de forma que cada GL é responsável por gerenciar os identificadores de cada função atômica, manter a relação das AFs pares (transmissor e receptor), além de manter o estado atual de cada alarme gerado pelas AFs gerenciado pelo GL.

Durante o estágio de inicialização da função atômica, cada AF envia ao GL seu identificador, de forma que o GL possa montar um “mapa” de quantas AFs estão conectadas e quem são seus pares. Caso uma AF seja desconectada da simulação, por motivo de falha ou mudança na topologia da rede, uma mensagem é enviada ao Gerente Local, para que esse possa remover a função atômica de suas tabelas.

Quando uma AF recebe um novo quadro OTN (hierarquia digital) ou um novo quadro de cabeçalho (hierarquia óptica), a AF faz o processamento do cabeçalho e envia o resultado por meio dos sinais MI. Ao receber um ou mais sinais MI, o GL faz uma comparação desses sinais com os valores previamente armazenados, e, em caso de mudança, os sinais alterados são enviados ao gerente de NE junto com informações de identificação do gerente local e da função atômica que enviou os sinais. De posse dessas informações, o gerente de NE atualiza um *log* de mudanças da rede, ou encaminha informações para outros elementos, como por exemplo, o agente de descoberta automática.

Além de receber mensagens das funções atômicas, o gerente local possui a habilidade de enviar informações de configuração às AFs, com finalidade de enviar mensagens de descoberta automática, informações de normais de trilha (TTI), ou sinais que habilitam ou desabilitam funcionalidades das AFs.

Assim como na implementação das funções atômicas, o gerente local é implementado como um módulo simples e como todo módulo simples, e possui um arquivo de descrição NED e uma classe codificada em C++ que descreve seu comportamento. A Figura I-4 e a Figura I-5, Apêndice I, mostram o arquivo NED do gerente local e o código C++ a classe *cLocalManager*.

As estruturas declaradas como atributos da classe são responsáveis pelo armazenamento dos alarmes durante a simulação. Cada estrutura contém as informações disponibilizadas pelas AFs da camada de mesmo nome, conforme as recomendações ITU-T G.798 e ITU-T G.874. A Figura 4-10 a seguir mostra uma das estruturas como exemplo, a estrutura *OMSinfo*, responsável por armazenar os alarmes originados pela terminação de trilha da camada OMS, mais especificamente pela função atômica *OMSn\_TT\_Sk*.



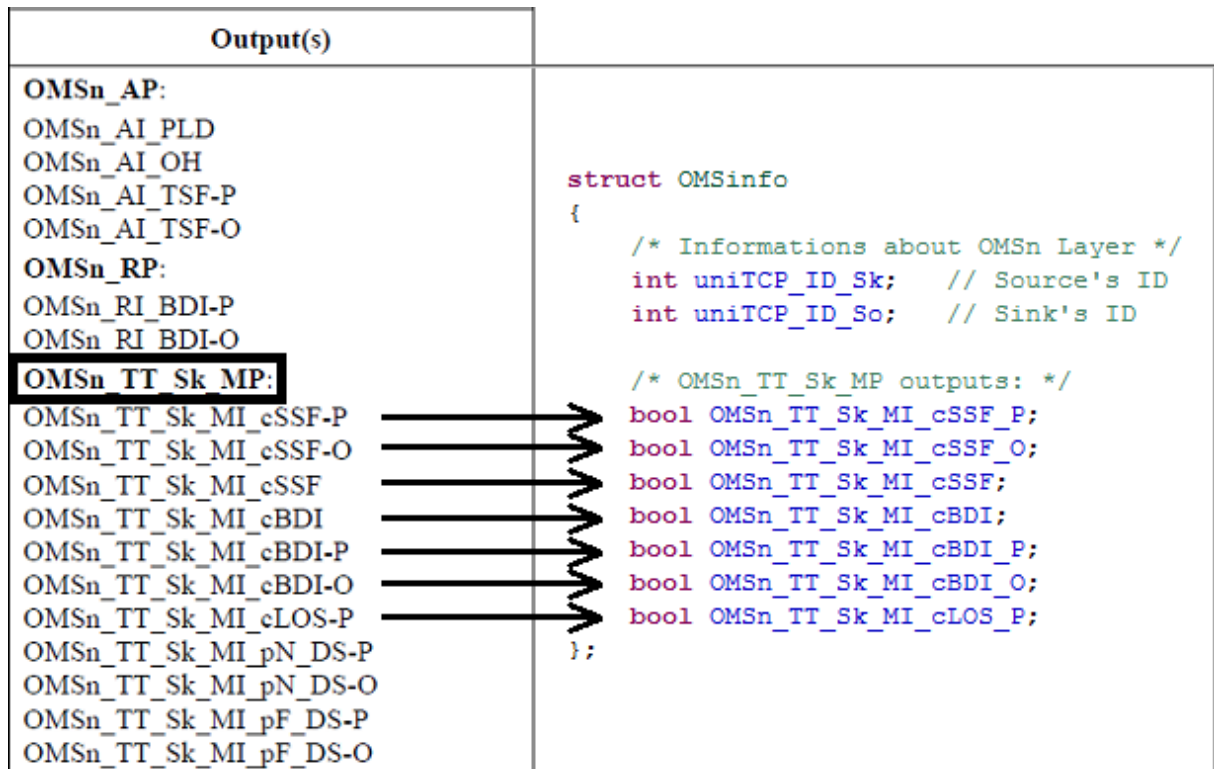


Figura 4-10: Estrutura OMSinfo, responsável por armazenar os alarmes originados na Função Atômica OMSn\_TT\_Sk.

A classe *cLocalManager* possui métodos específicos para o tratamento de mensagens de identificação (*update\_tcp\_information()*), mensagens de alarmes originadas nas camadas (*update\_[camada]\_information()*), além de mensagens de comunicação com o Gerente de NE (*report\_to\_NEManager*, etc.).

Ao receber uma mensagem, o método *handleMessage()* é acionado, verificando a porta de procedência da mensagem, avaliando qual método deve ser invocado para o tratamento correto da mensagem. Os tipos de mensagem utilizados no plano de gerência e suas características são apresentados na próxima seção.

#### 4.2.2.2 Mensagens da Gerência

Da mesma forma que mensagens são utilizadas para representar o fluxo de informações no plano de transporte, mensagens são utilizadas na representação de toda troca de informação interna ao plano de gerência e externa, na comunicação do plano de gerência com os planos de transporte e controle.

Durante a comunicação com o plano de gerência, cada função atômica fornece informações de identificação, seu identificador (TCP\_ID), e a camada a qual pertence (OTS, OMS, etc...). Essas informações são enviadas como parâmetros de uma classe de mensagem chamada *TCP\_ID\_Information*. Apesar de essa classe ser de extrema importância, nenhuma mensagem pertencente a ela é enviada diretamente, essa classe é uma *classe pai* utilizada como base para as demais classes de mensagens, que, efetivamente são enviadas durante a simulação. Em sua totalidade são criadas doze classes de mensagem (Figura I-6, Apêndice I), e outras duas classes utilizadas na comunicação com o plano de controle (Seção 4.2.3.2). Além dessas quatorze classes, são necessárias outras três classes relacionadas com a funcionalidade de descoberta automática, que não são abordadas nesta dissertação.

Além da classe de mensagem *TCP\_ID\_Information*, é definida uma classe de mensagem para a comunicação entre o gerente local e o gerente de NE, *Manager\_Information*, definidas mensagens para passagem de alarmes e informações de cabeçalho, (*ChangeField*, *ChangeFieldChar*, *ChangeFieldBool*), e mensagens de troca de sinais com as AF, que trafegam pelos pontos de gerenciamento, *OTSn\_TT\_MI*, *OMSn\_TT\_MI*, *OCh\_TT\_MI*, *OCh\_OTUk\_a\_A\_MI*, *OTUk\_TT\_MI*, *ODUkP\_TT\_MI*, *ODUkP\_PRBS\_A\_MI*. Na Figura I-6 e na Figura I-7, Apêndice I, são mostradas as classes, seus parâmetros e sua relação com outras mensagens.

As classes de mensagens de troca de sinais com as funções atômicas ([AF]\_MI), citadas anteriormente, possuem parâmetros cujo nome é idêntico ao nome dos sinais presentes nas recomendações ITU-T G.798 e ITU-T G.874. Dessa forma, para modelar os diversos sinais de uma função atômica, é criada uma única classe de mensagem, evitando criar uma classe de mensagem para cada sinal, o que poderia ocasionar um aumento desnecessário do custo computacional da simulação, já que dessa forma mais mensagens seriam geradas, ocasionando um aumento no número de eventos. A Figura 4-11 a seguir apresenta como exemplo a classe de mensagem *OTSn\_TT\_MI* e a relação de seus parâmetros com os sinais presentes na recomendação ITU-T G.798.

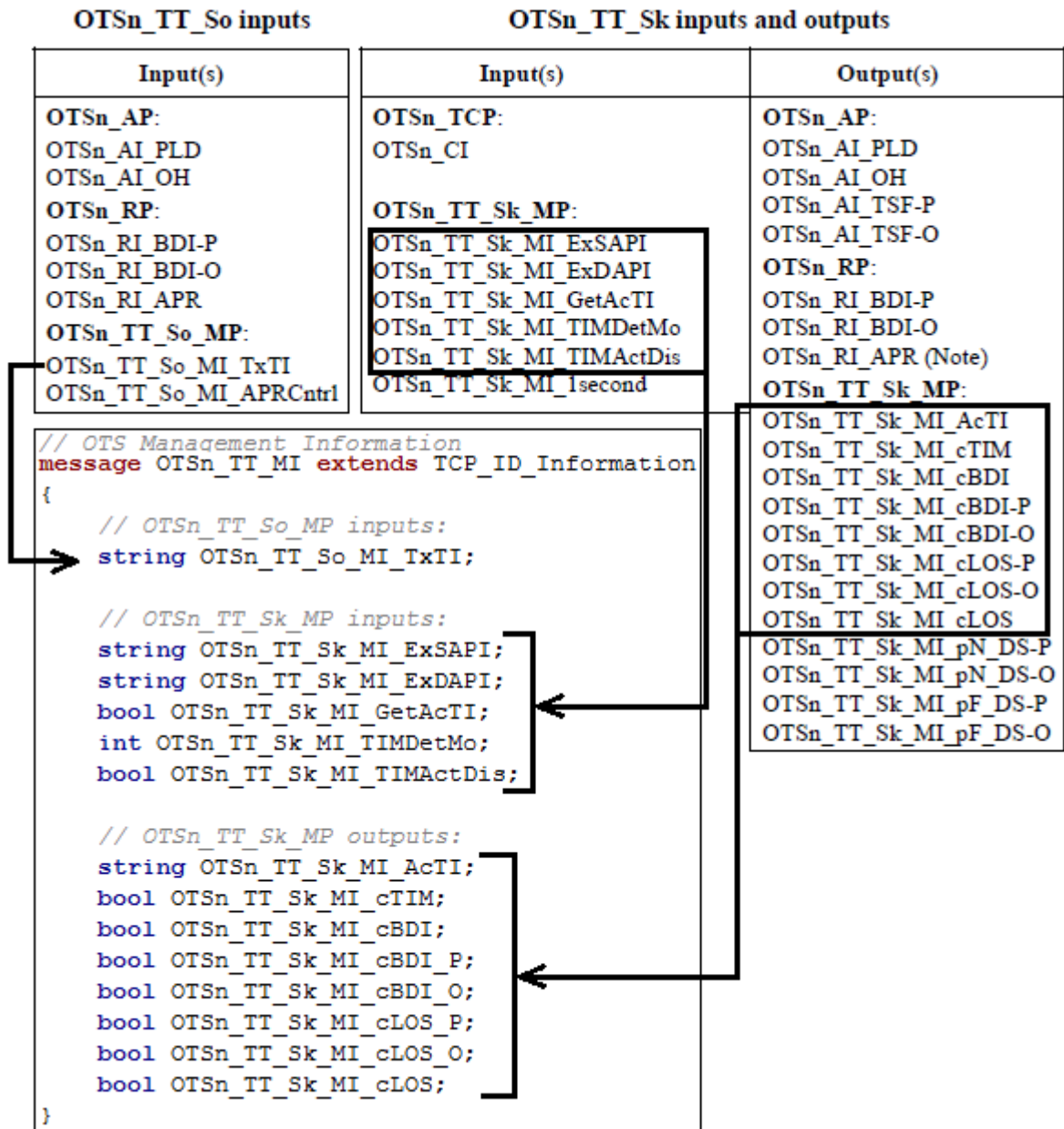


Figura 4-11: Relação entre as mensagens e os sinais na recomendação ITU-T G.798.

Na próxima seção são abordadas as mensagens utilizadas na comunicação do plano de gerencia com o plano de controle, além de seus componentes básicos, e as alterações realizadas em sua integração com o restante do *framework* de Simulação.

#### 4.2.3 Plano de Controle

Conforme o Capítulo 1, um dos objetivos desta dissertação é o aprimoramento do realismo das simulações de redes ópticas de transporte, e para isso, é necessário o

desenvolvimento de uma série de modelos, módulos e arquiteturas, pertencentes ao plano de gerência e principalmente ao plano de transporte. Para a validação desses novos elementos, esta dissertação faz uso do plano de controle criado em (FAVORETO, 2009). Para tal, é necessário substituir os componentes do plano de transporte pelos componentes desenvolvidos nesta dissertação, além de realizar as adaptações necessárias nos componentes do plano de controle.

#### 4.2.3.1 Integração do plano de controle com o plano de transporte

A Figura 4-12 (a) a seguir mostra o módulo GMPLS\_LSR desenvolvido em (FAVORETO, 2009), que representa um ONE com capacidade de efetuar comutação de fibras e de comprimentos de onda. O GMPLS\_LSR é formado por dois equipamentos, um controlador GMPLS, e um OXC. Já a Figura 4-12 (b) destaca o OXC, formado por funções atômicas de terminação e adaptação das camadas OTS e OMS, e uma função de conexão OCh\_C. É importante notar que nessa versão do OXC, não há gerência, e, dessa forma, toda comunicação entre o controlador GMPLS e o OXC é realizada de forma direta, conforme discutido na Seção 3.2.1.

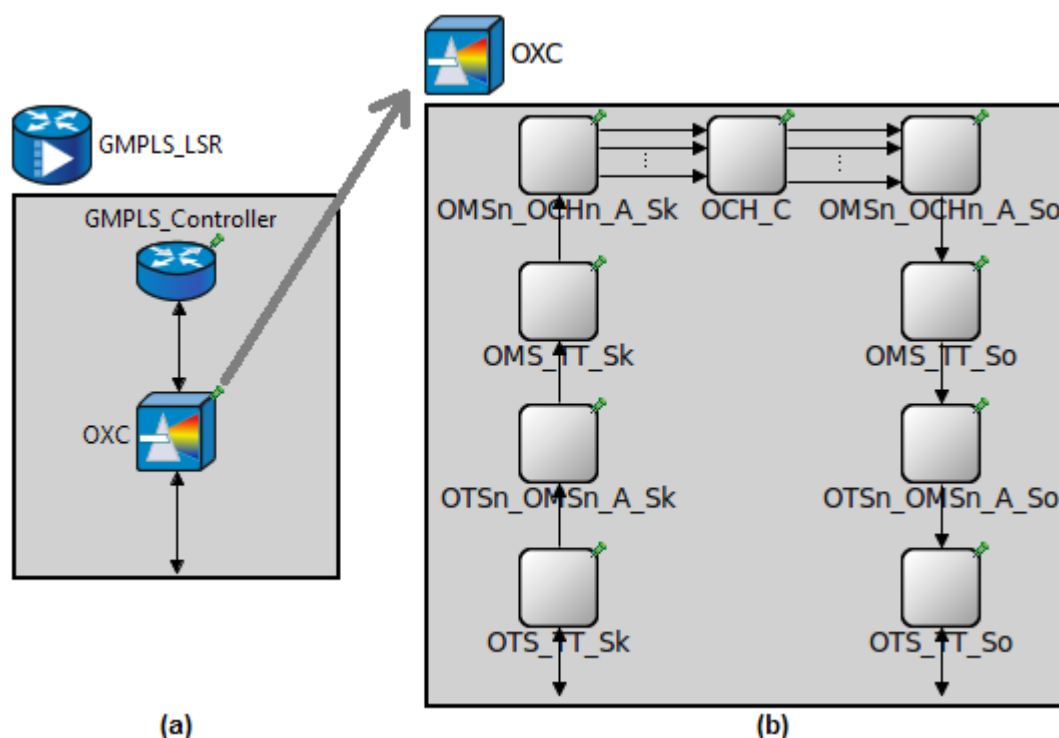


Figura 4-12: (a) Módulo GMPLS\_LSR composto por um controlador GMPLS e um OXC.  
 (b) Módulo OXC em destaque. (FAVORETO, 2009).

O primeiro passo no processo de integração do plano de controle proposto em (FAVORETO, 2009) com os demais planos implementados nesta dissertação, consiste na substituição do módulo OXC, ou seja, a substituição das funções de adaptação e terminação implementadas em (FAVORETO, 2009), pela nova versão dessas funções atômicas, Seção 4.2.1.1.

Dada a incompatibilidade das funções atômicas implementadas nesta dissertação, com a função de conexão OCh\_C previamente implementada por Favoreto, faz-se necessária uma série de modificações na classe na classe cOCh\_C, dentre elas a inclusão do *Management Point* OCh\_C\_MP, que possibilita a troca de informações com os gerentes locais, além da inclusão e modificação de alguns métodos, responsáveis pelo recebimento e processamento das mensagens de gerência e cabeçalho. As mensagens de gerência recebidas pela classe cOCh\_C são encaminhadas por um gerente local e contém comandos originados no plano de controle, com instruções de configuração da matriz de comutação da função de conexão OCh\_C, conforme a arquitetura proposta na Seção 3.2.2; já as mensagens de cabeçalho recebidas, referem-se ao cabeçalho das camadas ópticas, ou seja, os alarmes descritos na recomendação ITU-T G.798.

Além das modificações já citadas, outro importante aspecto merece atenção. Na primeira versão da implementação do plano de controle (FAVORETO, 2009), a terminação de trilha da camada OTS não é capaz de lidar com mensagens contendo informações dos alarmes ITU-T G.798, Seção 3.2.1; e, na primeira versão da implementação do plano de transporte (TESSINARI, 2009), tais alarmes são implementados, adicionalmente à capacidade de tratamento e transmissão desses nas terminações de trilha da camada OTS, porém, devido ao fato do trabalho de Tessinari não contemplar a comunicação entre o plano de transporte com os demais planos, as terminações de trilha da camada OTS não possuem a capacidade de tratar as mensagens originadas no plano de controle. Dessa forma, as classes cOTS<sub>n</sub>\_TT\_So e cOTS<sub>n</sub>\_TT\_Sk, representando as terminações de trilha da camada OTS, são atualizadas de forma a possibilitar a transmissão de ambos tipos de mensagens, alarmes ITU-T G.798 e do canal de controle GMPLS, levando-se em consideração questões de desempenho, já que os alarmes possuem pré-requisitos temporais de propagação pela rede.

Como resultado da implementação, na Figura 4-13 a seguir é mostrado o novo módulo OXC, composto por três sub-módulos: um módulo “Gerência”, contendo o gerente de NE (*NEManager*), *n* módulos de gerentes locais (*LocalManager[i]*) e o agente de descoberta (DA); um vetor com *n* módulos OTH, ou seja, um módulo contendo uma instância da hierarquia óptica OTN para cada par de fibras presente no OXC; e um módulo com a função de conexão OCh\_C.

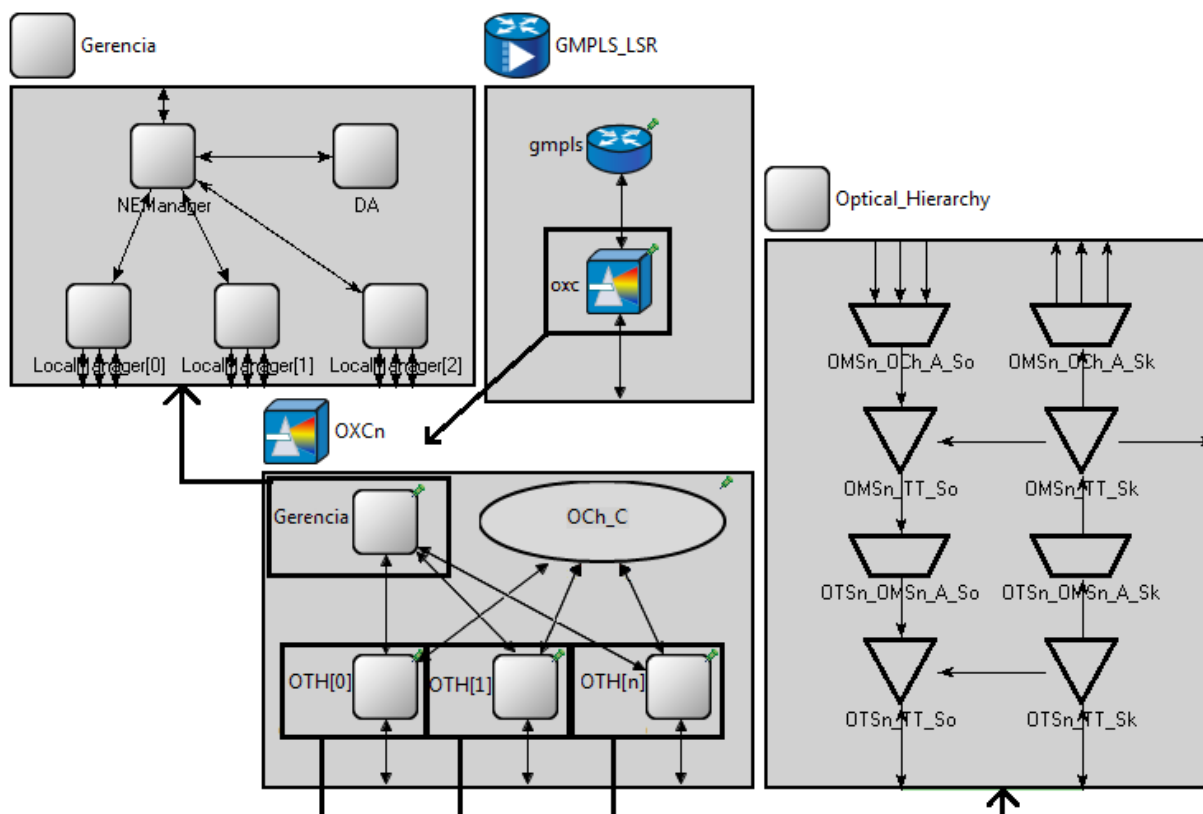


Figura 4-13: Novo módulo OXC, destacando a gerência e o módulo OTH.

Para concluir integração do plano de controle com o plano de transporte, além de realizar mudanças no OXC, é necessário realizar alterações no controlador GMPLS, conforme a seção a seguir.

#### 4.2.3.2 Implementação da nova arquitetura para o plano de controle

Na Seção 3.2.2 desta dissertação é apresentada uma proposta de arquitetura para o plano de controle OTN, na qual é sugerido que toda comunicação realizada entre o plano de controle e o plano de transporte seja realizada por intermédio do plano de gerência. Esta Seção apresenta a implementação de parte dessa arquitetura, tomando-se por base a implementação desenvolvida por (FAVORETO, 2009).

Conforme descrito na Seção 3.2.2, duas formas de comunicação entre os planos de transporte e controle são previstas na arquitetura: a troca de mensagens entre o controlador GMPLS e a função de conexão OCh\_C, necessária para que seja possível configurar a matriz de comutação implementada pelo OCh\_C; e o envio das mensagens de sinalização GMPLS, ou seja, as mensagens do canal de controle GMPLS.

Nesta dissertação é implementada apenas uma das formas de comunicação, a comunicação entre o controlador GMPLS e a função de conexão OCh\_C, conforme discutido a seguir. A implementação transporte do canal de controle GMPLS é deixado como sugestão para trabalhos futuros, devida à ausência de um elemento do plano de transporte que se faz necessário para sua implementação, a função de processamento de camada, ITU-T G.800 (ITU-T, 2007).

Na Seção 4.4 de (FAVORETO, 2009) é descrita a implementação e as funcionalidades dos componentes do controlador GMPLS. A Figura 4-14 (a) a seguir mostra a primeira versão do controlador GMPLS enquanto em (b) é mostrado o controlador atualizado nesta dissertação. De todo o controlador, apenas o módulo simples “*otn\_adaptation*” sofre modificações, tanto em sua classe, como no seu arquivo NED.

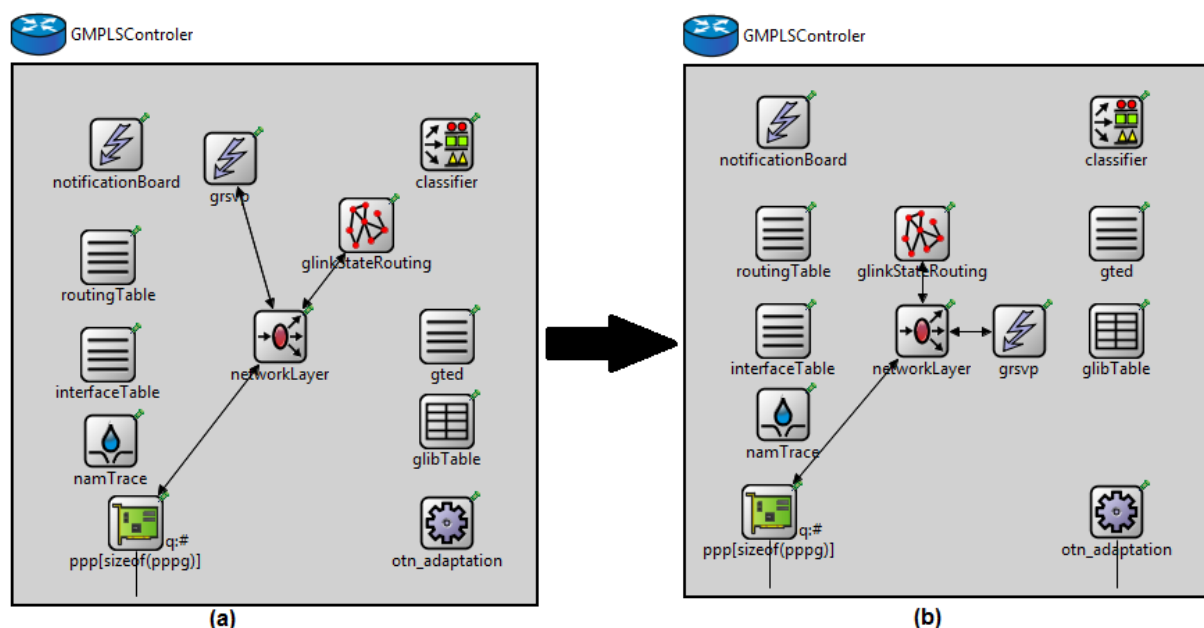


Figura 4-14: Controlador GMPLS. (a) (FAVORETO, 2009). (b) Versão atualizada.

De acordo com (FAVORETO, 2009), o módulo *otn\_adaptation* consiste em uma interface entre o controlador GMPLS e o ONE do plano de transporte (na simulação,

um OXC) e, é utilizado para configurar a conexão na matriz de conexão da função de conexão OCh\_C, além de obter informações sobre os canais OTN associados ao OXC. As alterações na classe cOTN\_Adaptation condizem com a mudança na sua forma de comunicação com a classe cOCh\_C, em virtude que anteriormente essa comunicação ser realizada de forma direta, por meio de ponteiros.

Na próxima seção são mostradas as mensagens utilizadas na comunicação do plano de controle com o plano de transporte.

#### **4.2.3.3 Mensagens**

Duas novas mensagens são necessárias para que se realize a comunicação do módulo *otn\_adaptation* com a função de conexão OCh\_C: *controlPlane\_Request* e *MI\_MatrixControl*, Figura I-8, Apêndice I.

Quando necessário, o plano de controle, mais especificamente o módulo *otn\_adaptation* envia uma mensagem *controlPlane\_Request* ao Gerente de NE, com os pares de informação (porta\_de\_entrada/rótulo\_de\_entrada) e (porta\_de\_saída/rótulo\_de\_saída). Ao receber essa mensagem, o Gerente de NE realiza uma tradução das informações, ou seja, cria uma mensagem *MI\_MatrixControl*; endereça e envia ao Gerente Local, que por sua vez que encaminha à OCh\_C, que processa a mensagem e realiza alterações em sua matriz de comutação. Vale reforçar que apesar dos campos das mensagens serem os mesmos (quatro inteiros), eles possuem escopos distintos, ou seja, para o plano de controle GMPLS, existem portas e rótulos, enquanto que para a OCh\_C existem fibras e comprimentos de onda. Essa distinção de escopo permite que o plano de controle seja capaz de lidar com diferentes tecnologias no plano de transporte, controlando tanto comutação de comprimentos de onda no nível OCh, como comutação por divisão de tempo TDM.



#### 4.2.4 Considerações Finais

Neste capítulo de implementação são descritos os principais aspectos de implementação desta dissertação. Muitas informações são omitidas por serem consideradas repetitivas, ou não muito relevantes ao propósito desta dissertação.

Em resumo, e a título de curiosidade, a Tabela 4-3 a seguir compila algumas informações a respeito do atual estágio de desenvolvimento do *framework* de simulação.

**Tabela 4-3: Informações gerais sobre o *framework* de simulação.**

Número de classes de AF	38
Número classes de mensagens	40
Módulos implementados	58
Arquivos de topologia de Rede	7
Linhas de código (total aproximado)	19.127

## 5 TESTES

Este capítulo tem como objetivo validar as arquiteturas propostas, e os módulos implementados, por meio de testes. Primeiramente, na Seção 5.1 são apresentados os equipamentos utilizados para montar as topologias de rede dos casos de teste, Seção 5.2.

### 5.1 EQUIPAMENTOS OTN

No Capítulo 4 é apresentado o simulador OMNeT++ e como é realizada a implementação dos componentes funcionais que juntos compõem a OTN, como as funções atômicas do plano de transporte, gerentes do plano de gerência, e controladores do plano de controle. Cada um desses componentes resulta em um módulo simples.

Utilizando os módulos simples e fazendo uso da linguagem de descrição de rede (NED – *Network Description*) é possível criar módulos mais complexos, chamados módulos compostos. Seguindo a Seção 2.2.4 é possível criar módulos compostos que representam os equipamentos tipicamente encontrados em uma rede óptica de transporte, como multiplexadores, *transponders*, amplificadores, etc., e, unindo esses equipamentos, é possível formar novos módulos compostos, que representam ONEs (*Optical Network Elements*).

Nesta dissertação são criados os seguintes equipamentos: amplificador de entrada (PRE\_AMP) e amplificador de saída (AMP\_BOOSTER), Figura II-1, multiplexador (MUX), demultiplexador (DEMUX), multiplexador/demultiplexador de canal de supervisão (SOM\_SOD) Figura II-2, e gerente (MANAGER), Figura II-3, cujos módulos são mostrados no Apêndice II. Além dos equipamentos criados, é utilizado um equipamento *transponder* (TRANSPONDER) Figura A-1, e um controlador GMPLS desenvolvido em (FAVORETO, 2009), Figura A-3, mostrados no ANEXO A.

Para os casos de testes realizados nesta dissertação, são utilizados os seguintes ONEs: *host* OTN (ONE\_Host\_OTN) Figura II-4, Apêndice II, e OXC (ONE\_OXC) Figura II-5, Apêndice II, criados nesta dissertação. Além desses, são utilizados o roteador GMPLS (ONE\_GMPLS\_LSR), criado em (FAVORETO, 2009), Figura A-3 Anexo A. O *host* OTN (Figura A-2) é responsável por gerar e receber tráfego na rede, enquanto os amplificadores bidirecionais (Figura A-4) são ONEs com capacidade de amplificação do sinal óptico nos sentidos *downstream* e *upstream*. Os ONEs OXC (Figura II-5) são responsáveis pela comutação de fibras e de comprimentos de onda, mas, cabe ressaltar que os ONE\_OXCs não possuem controladores, sendo essa a diferença entre os ONE\_OXCs e os ONE\_GMPLS\_LSR (Figura A-3), que por sua vez são compostos por um *equipamento* OXC e um controlador GMPLS.

## 5.2 REDES DE TESTE

Para validar as propostas apresentadas, o código gerado e os módulos implementados, são propostos dois casos de testes: (1) rede de teste do plano de controle OTN e (2) rede simples simulando uma falha de corte de fibra.

### 5.2.1 Caso de Teste 1: Plano de controle

Este primeiro caso de teste possui dois objetivos: (i) validar as modificações nos elementos de plano de transporte, apresentadas na Seção 4.2.1 e, (ii) validar a arquitetura para o plano de controle proposta nas Seções 3.2.2 e 4.2.3.

Para alcançar tais objetivos, é utilizado como comparação o teste realizado em (FAVORETO, 2009), que consiste em estabelecer um caminho óptico OCh (OCh LSP – *Optical Channel Label Switched Path*) entre dois *hosts* OTN, conforme a Figura 5-1.

Inicialmente os roteadores LSR (*Label Switching Router*) são inicializados sem nenhuma rota configurada, de forma que os sinais gerados pelos *hosts* são

bloqueados pelos LSRs, até que o OCh LSP seja estabelecido. Um trecho do log contendo os resultados obtidos em (FAVORETO, 2009), é mostrado na Figura B-1, Anexo B.

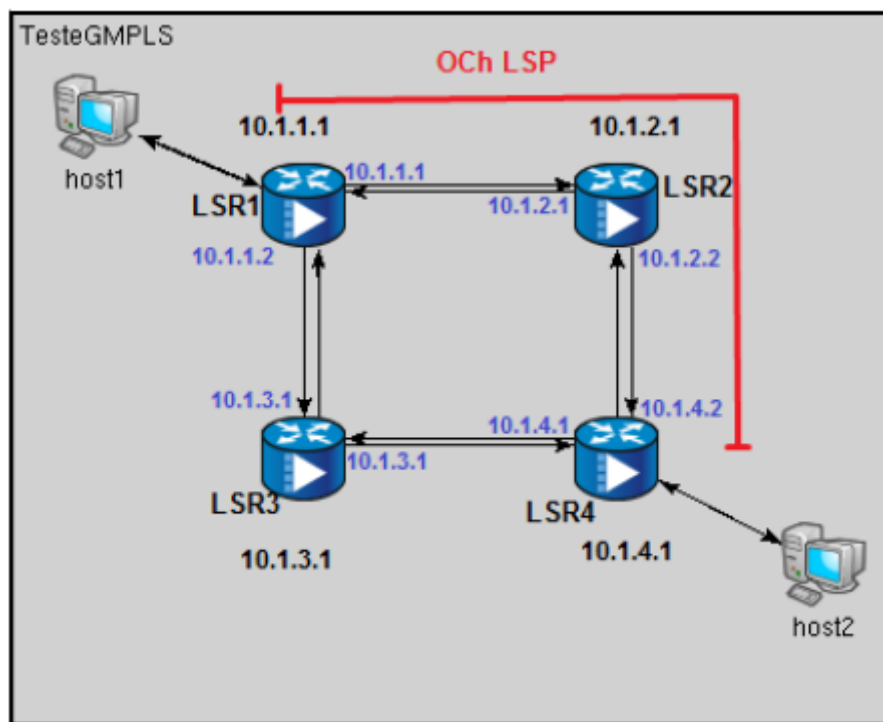


Figura 5-1: Rede de teste do plano de controle. (FAVORETO, 2009)

Esse cenário de teste parte da premissa de que ao alterar os equipamentos relacionados com o plano de transporte, mantendo o controlador GMPLS, os resultados obtidos devem ser semelhantes aos encontrados em (FAVORETO, 2009).

De fato, essa premissa se confirma, conforme mostra a Figura 5-4 a seguir.

Assim como em (FAVORETO, 2009), inicialmente as matrizes de conexão dos OXCs são configuradas no modo bloqueio (Figura 5-2), não permitindo a propagação de nenhum sinal (Figura 5-3).

Após a troca de sinalização, no tempo 1,2000001912s, o bloco *grsvp*, por meio do bloco *OTN\_Adaptation*, envia duas mensagens de controle para o plano de gerência, contendo informações utilizadas pela OCh\_C para configurar sua matriz de conexão, conforme indicado por (1) na Figura 5-4. Logo em seguida essas mensagens passam pelo gerente de NE e depois pelo gerente local responsável pela função de conexão OCh\_C (eventos #1344, #1345, #1346, #1347 e #1348).

```

Initializing module TesteGMPLS.lsr1.oxc.OCh_C, stage 0
[XML] Initializing oxc from XML file. Type: block Delay: 1
## Connection Matrix at oxc ##
Fiber: 0
(0/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0 (-1/-1)
(0/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0 Bloqueado
(0/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 1
(1/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 2
(2/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0

```

Figura 5-2: Inicialização de um OXC no modo bloqueado.

```

*** Event #367 T=0.2 TesteGMPLS.lsr1.oxc.OCh_C [cOCh_C, id=13], on 'host1MSG' (OTNMsg, id=486)
PLD Chegou para ser comutado no OCH_C. Informacoes:
Fibra IN: 2 Wave IN: 1
Imprimindo a Matrix de Comutacao: ## Connection Matrix at oxc ##
Fiber: 0
(0/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 1
(1/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 2
(2/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
[cOCh_C] Signal Blocked (Fiber/Wavelength): (2/1), host1MSG deleted

```

Figura 5-3: Bloqueio da mensagem “host1MSG”, pelo LSR1, no tempo 0.2s.

Ao receber a mensagem MI\_MatrixControl, o módulo OCh\_C inicia o processo de configuração de sua matriz de conexão, processo esse que demanda dois segundos para ser concluído. Durante esse tempo, as mensagens ópticas recebidas continuam sendo bloqueadas até que a configuração da OCh\_C seja concluída.

Na Figura 5-4, próximo à marca (2), o evento #2962 mostra o recebimento de uma mensagem pelo LSR4 com 4,2s de simulação. Observa-se que, como resultado da atuação do plano de controle, o sinal é comutado com sucesso.

Esse procedimento de configuração prossegue até o ponto em que todos os LSRs são configurados e a rota é estabelecida, e as mensagens enviadas entre os dois *hosts* são recebidas com sucesso (evento #4295 e evento #4296, Figura 5-4).

```

** Event #1342 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp (GRSVP, id=207), on selfmsg '{rsb commit
commit reservation (RSB 1)
currently allocated: {bandwidth:0}
currently required: {bandwidth:1e+10}
additional bandwidth of 1e+10 allocated sucessfully
processing lspid=100
installing label for 100 outLabel=1 outInterface=lo0, inInterface=ppp1, inLabel=1
...
TesteGMPLS.lsr4.gmpls.otn_adaptation, inLabel = 1, outLabel=1, inInterface=ppp1 (1), outInterface=lo0 (2)
...
TesteGMPLS.lsr4.gmpls.otn_adaptation, inLabel = 2, outLabel=2, inInterface=lo0 (2), outInterface=ppp1 (1)
...
** Event #1344 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.Gerencia.NEManager (cNEManager, id=199), on
** Event #1345 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.Gerencia.NEManager (cNEManager, id=199), on
** Event #1346 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.gmpls.networkLayer.ip (IP, id=215), on '{ Resv' (RSV
Routing datagram '{ Resv' with dest=10.1.2.1: output interface is ppp1, next-hop address: <unspec>
** Event #1347 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.Gerencia.LocalManager[0] (cLocalManager, id=19
** Event #1348 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.Gerencia.LocalManager[0] (cLocalManager, id=19
** Event #1349 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.gmpls.networkLayer.arp (ARP, id=216), on '{ Resv'
Packet (IPDatagram) Resv arrived from higher layer, output interface ppp1 is not broadcast, skipping ARP
** Event #1350 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCh_C (cOCh_C, id=170), on 'MI_Matrix_Control'
Criando Self-Message com os seguintes parametros (1/1) -> (2/1)
Agendei configureConnection para: 3.2000001912s
** Event #1351 T=1.2000001912 TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCh_C (cOCh_C, id=170), on 'MI_Matrix_Control'
Criando Self-Message com os seguintes parametros (2/2) -> (1/2)
Agendei configureConnection para: 3.2000001912s
...
** Event #1950 T=2.2 TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCh_C (cOCh_C, id=170), on 'host2MSG' (OTNMsg, id=980)
PLD Chegou para ser comutado no OCH_C. Informacoes:
Fibra IN: 2/Wave IN: 2
Imprimindo a Matrix de Comutacao:## Connection Matrix at oxc ##
Fiber: 0
(0/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 1
(1/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 2
(2/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
[cOCh_C] Signal Blocked (Fiber/Wavelength): (2/2), host2MSG deleted
...
** Event #2962 T=4.2 TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCh_C (cOCh_C, id=170), on 'host2MSG' (OTNMsg, id=1388)
PLD Chegou para ser comutado no OCH_C. Informacoes:
Fibra IN: 2/Wave IN: 2
Imprimindo a Matrix de Comutacao:## Connection Matrix at oxc ##
Fiber: 0
(0/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(0/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 1
(1/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(1/1) -> (2/1) Bidirectional: 0
(1/2) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
Fiber: 2
(2/0) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/1) -> (-1/-1) Bidirectional: 0
(2/2) -> (1/2) Bidirectional: 0
[cOCh_C] Fiber switch (2/2) -> (1/2)
...
** Event #4295 T=6.500013056 TesteGMPLS.host2 (Txc8, id=3), on 'host1MSG' (OTNMsg, id=1800)
...
** Event #4296 T=6.500013056 TesteGMPLS.host1 (Txc8, id=2), on 'host2MSG' (OTNMsg, id=1801)

```

Figura 5-4: Trechos do log obtidos durante a simulação.

### 5.2.2 Caso de Teste 2: Rede com falha

O objetivo deste teste é demonstrar o funcionamento da detecção de defeitos e a correlação de alarmes na rede. Para isso é utilizada a topologia mostrada na Figura 5-5 a seguir, composta por dois *hosts*, três ONE de amplificação e um ONE OXC.

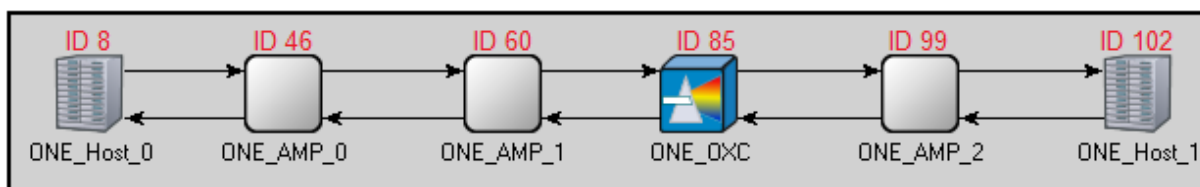


Figura 5-5: Rede de teste com falha.

Para este teste é simulado um corte de fibra entre o ONE\_Hos\_0 e o ONE\_AMP\_O e espera-se que os *logs* gerados pela gerência dos ONEs estejam de acordo com a recomendação ITU-T G.798.

A Figura 5-6 (a) a seguir apresenta o estado inicial da rede de teste em funcionamento normal, sem nenhuma falha.

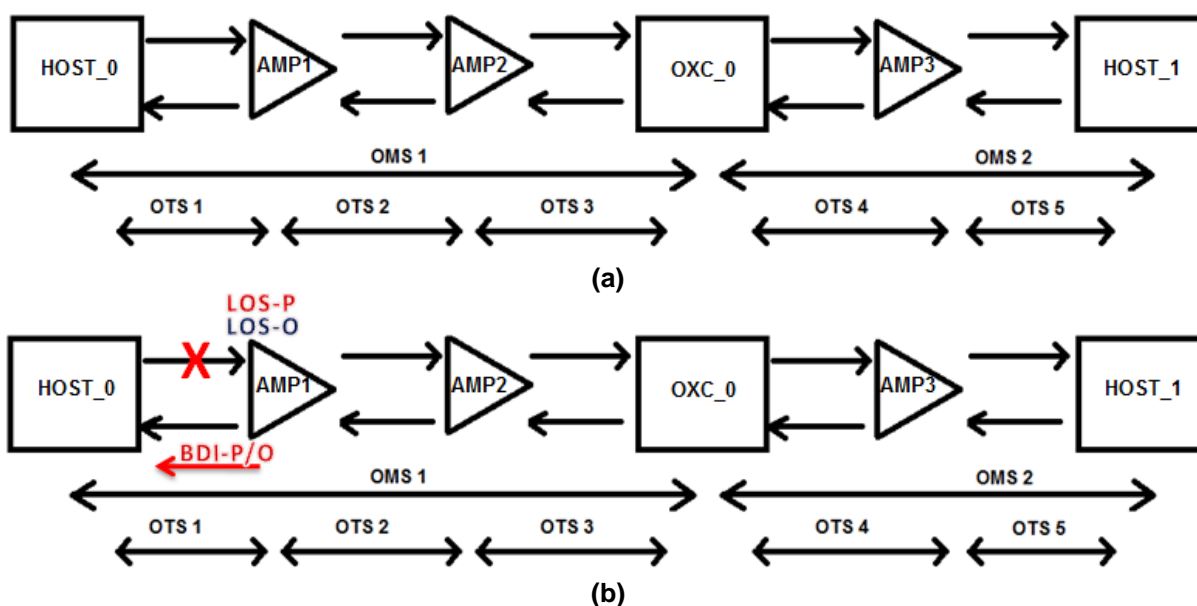


Figura 5-6: Esquema da topologia da rede de teste. (a) rede em funcionamento normal. (b) Corte na fibra entre HOST\_0 e AMP1.

No momento representado na Figura 5-6 (b) acontece um rompimento da fibra entre o Host\_0 e AMP1, desencadeando a detecção da perda dos sinais de dados e do canal de supervisão (LOS-P/O – *Loss Of Signal Payload/Overhead*) pela camada OTS do AMP1, que dispara o sinal MI\_LOS (*Management Information Loss Of*

Signal) para a gerência, e BDI-P/O (*Backward Defect Indication Payload/Overhead*), para o HOST\_0.

Com a perda do sinal de dados, o ONE AMP1 envia um sinal de PMI (*Payload Missing Indication*) para o ONE AMP2 pelo canal de supervisão que interliga os dois ONEs. Com o recebimento do PMI, a correlação de alarmes de AMP2 ignora a ausência de sinal cliente, já que o erro está localizado entre HOST\_0 e AMP1 e não entre AMP1 e AMP2, Figura 5-7 (a) a seguir. Cabe salientar que: (i) como um amplificador não termina a camada OMS, ele não é capaz de detectar a falha nesse nível, e (ii) a falha do canal de supervisão entre Host\_0 e AMP1 não interfere no canal de supervisão entre os demais ONEs.

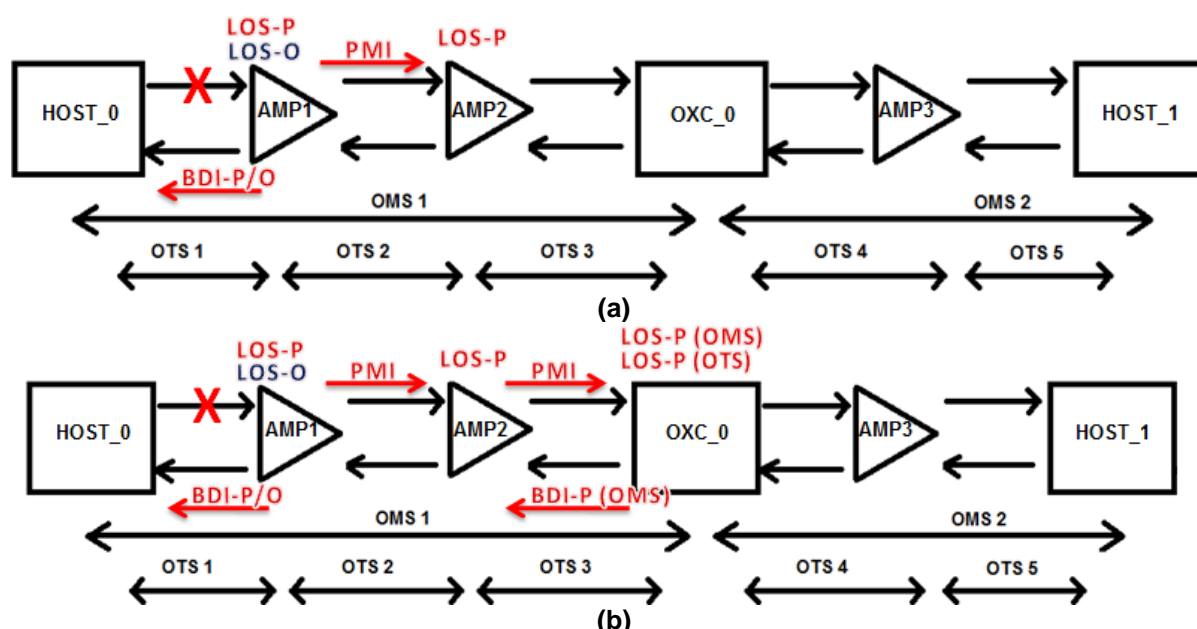


Figura 5-7: Propagação dos sinais pela rede. (a) Emissão do PMI pelo AMP1. (b) Detecção das falhas pelo ONE OXC\_0.

Na Figura 5-7 (b) a ausência de sinal de dados é detectada pelo ONE OXC\_0. Assim como no AMP2, o recebimento do PMI inibe os alarmes relacionados com a falha de OTS, mas na terminação da camada OMS é detectada o LOS-P, ativando o envio do sinal MI\_LOS-P para a gerência e o envio de BDI-P no sentido *upstream*, para o ONE HOST\_0.

Por fim, na Figura 5-8 a seguir é mostrado o restante da propagação dos sinais. Assim como no AMP2, o recebimento do PMI pelo ONE AMP3 inibe os alarmes relacionados com a falha de sinal de dados.



No HOST\_1 tanto a camada OTS quanto a camada OMS detectam a ausência do sinal de dados, mas os PMIs recebidos inibem o desencadeamento de alarmes resultantes dessas falhas.

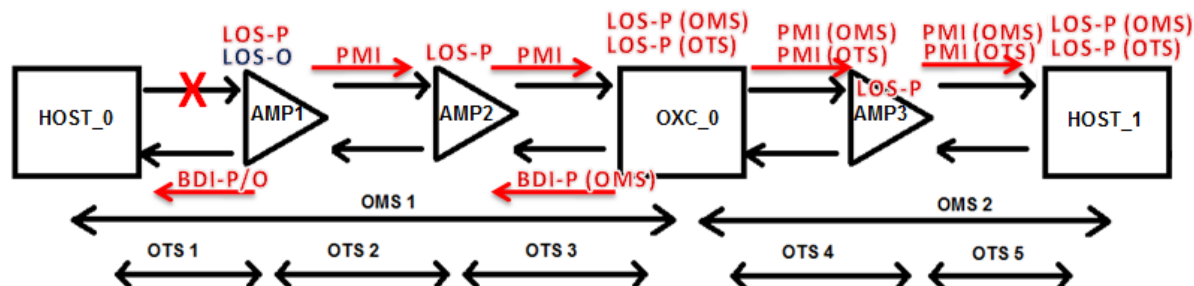


Figura 5-8: Propagação das falhas pela rede.

A Tabela 5-1 a seguir resume os defeitos detectados pelos ONEs e os sinais enviados à gerência, enquanto a Figura 5-9 mostra os resultados obtidos pela simulação. O log completo é mostrado na Figura III-1, Apêndice III.

Uma rápida comparação da Figura 5-9 com a Tabela 5-1 revela que os resultados obtidos pela simulação correspondem aos resultados esperados. Da onde se pode concluir que os módulos simulados estão de acordo com a recomendação ITU-T G.798.

Tabela 5-1: Tabela resumindo os defeitos detectados e os sinais enviados à gerência.

ONE	Falha(s)/defeito(s) detectado(s)	Sinais reportados à gerência	Overhead recebido via canal de supervisão
HOST_0	N/A	cBDI (OTS) cBDI-P (OMS)	BDI-P / BDI-O (OTS) BDI-P (OMS)
AMP1	dLOS-P / dLOS-O (OTS)	cLOS (OTS)	N/A
AMP2	dLOS-P (OTS)	N/A	PMI (OTS)
OXC_0	dLOS-P (OTS) dLOS-P (OMS)	cLOS-P (OMS)	PMI (OTS)
AMP3	dLOS-P (OTS)	N/A	PMI (OTS)
HOST_1	dLOS-P (OTS) dLOS-P (OMS)	N/A	PMI (OTS) PMI (OMS)

```

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 8.
@TIME: 0.0035 ### Layer: (1) OTS / NE: 8 / TCP: 6 / Field: cBDI / Change to: TRUE
@TIME: 0.052471001 ### Layer: (2) OMS / NE: 8 / TCP: 7 / Field: cBDI_P / Change to: TRUE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 46.
@TIME: 0.0001 ### Layer: (1) OTS / NE: 46 / TCP: 0 / Field: cLOS / Change to: TRUE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 60.

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 85.
@TIME: 0.0003 ### Layer: (2) OMS / NE: 85 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 99.

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 102.
@TIME: 0.051471001 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (5) OTU / NE: 102 / TCP: 3 / Field: cSSF / Change to: TRUE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (7) ODU / NE: 102 / TCP: 5 / Field: cSSF / Change to: TRUE

```

**Figura 5-9: Log simplificado gerado na simulação.**

### 5.3 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo a validação das arquiteturas propostas nos capítulos anteriores. Os testes realizados mostram que os objetivos pretendidos com esta dissertação foram alcançados com sucesso.

O primeiro caso de teste mostra que a integração com o plano de controle desenvolvido em (FAVORETO, 2009) ocorreu da maneira esperada, dando indícios de que as arquiteturas propostas no Capítulo 3 podem ser utilizadas de forma satisfatória. Além disso, o fato do controlador GMPLS ter funcionado assim como em (FAVORETO, 2009), validam as alterações realizadas nos componentes do plano de transporte.

Do segundo caso de teste, conclui-se que a implementação das funções de adaptação e terminação de trilhas está de acordo com a recomendação ITU-T G.798 e, demonstra que o ambiente de simulação em desenvolvimento possui um grande potencial na análise de “reação da rede” no caso de falhas para redes de topologias mais complexas.

## 6 CONCLUSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões do trabalho desenvolvido. São apresentados os resultados obtidos e definidas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 RESULTADOS

Ao longo das pesquisas realizadas e no desenvolvimento desta dissertação, verificou-se que existe um longo caminho entre entender uma tecnologia e utilizá-la como ferramenta na resolução de um problema. Embora os órgãos de padronização, como a ITU-T, IETF, etc., ofereçam uma boa base de documentos de especificação de arquiteturas e protocolos, a experiência adquirida mostrou que muitas questões surgem na hora de aplicar essas informações. Mais do que isso, esta dissertação mostra também que mesmo para associar informações de diferentes recomendações é necessário um esforço extra para analisar e efetuar essa união.

O objetivo principal do trabalho, a integração e aperfeiçoamento dos trabalhos apresentados na Seção 2.5, foi alcançado com sucesso. Para isso foram criados diversos módulos e classes para o *framework* de simulação de redes ópticas de transporte para o simulador OMNeT++.

A arquitetura para o plano de gerência proposta na Seção 3.1.3 mostrou-se capaz de se comunicar com as funções atômicas do plano de transporte, recebendo informações de alarme e trocando informações de configuração e de descoberta automática, além de servir como meio de comunicação entre o plano de controle, e o plano de transporte, recebendo informações de controle, convertendo-as e enviando-as para as funções de conexão OCh\_C.

Na Seção 3.2.2 é abordada a proposta de arquitetura para o plano de controle, enquanto na Seção 4.2.3 é abordada a implementação dessa arquitetura. Devida à ausência de implementação de algumas funções atômicas do plano de transporte, como as funções de terminação e adaptação COMMS, apenas parte da arquitetura

proposta pode ser implementada e validada na Seção 5.2.1. A arquitetura demonstrou ser solução viável de comunicação, e permite dois importantes fatos: (i) o compartilhamento do canal de supervisão OTN com o canal de controle GMPLS e os sinais de supervisão previstos na recomendação ITU-T G.798, e (ii) a viabilização do envio de comandos de configuração às funções de conexão por intermédio do plano de gerência.

Outro importante objetivo alcançado nesta dissertação diz respeito ao aprimoramento dos elementos de plano de transporte herdados dos trabalhos citados na Seção 2.5. Esses elementos receberam diversas atualizações em seu funcionamento, além de novas funcionalidades, como a capacidade de comunicação com os gerentes locais, novos geradores de tráfego, novos alarmes e mecanismos utilizados como forma de simulação de falhas. Na Seção 5.2.1 é apresentado um teste com a mesma topologia de rede utilizada em (FAVORETO, 2009), obtendo-se resultados semelhantes, e consequentemente validando as mudanças efetuadas no plano de transporte.

A Tabela 6-1 a seguir mostra os principais pontos desenvolvidos nesta dissertação.

**Tabela 6-1: Resumo do que foi desenvolvido nesta dissertação.**

Plano de Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Re-implementação das camadas OTN, adicionando novas funcionalidades (como cálculo de BIP-8, <i>multiframe</i>, etc.), alarmes e falhas;</li> <li>- Módulos geradores de tráfego, suportando diversas taxas;</li> <li>- Atualização da função de conexão OCh_C;</li> <li>- Novas mensagens, respeitando a estrutura de quadro OTN;</li> <li>- Novos processos ITU-T G.798, permitindo a comunicação com a gerência e o processamento de TTI, permitindo a integração com a funcionalidade de descoberta automática.</li> </ul>
Plano de Gerência	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposta de uma arquitetura para o plano de gerência;</li> <li>- Criação da classe e do módulo gerente local (<i>cLocalManager</i>);</li> <li>- Suporte à comunicação com a funcionalidade de descoberta e plano de controle.</li> </ul>

Plano de Controle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposta de uma arquitetura para o plano de controle;</li> <li>- Adaptação da classe <i>OTN_Adaptation</i>, habilitando a capacidade de comunicação com o plano de gerência.</li> <li>- Integração e otimização do código desenvolvido em (FAVORETO, 2009);</li> </ul>
Equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Novos equipamentos: Gerência genérica (<i>GenericManager</i>), Host OTN e OXC;</li> <li>- Novos arquivos de configuração, que permitem diversas mudanças nos parâmetros da simulação, como quantidade de canais/clientes, ativação/desativação da geração de sinais, cabeçalho e/ou falhas, etc.</li> </ul>

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas a fim de abranger tudo aquilo que ficou fora do escopo. As sugestões de trabalhos futuros são apresentadas em três categorias, cada qual relacionada a um dos planos OTN:

- Plano de Transporte: (1) Estudar a recomendação ITU-T G.800, e implementar as funções de processamento, de terminação e de adaptações COMMS; (2) adicionar novas funcionalidades às funções atômicas existentes, assim como implementar novas funções atômicas, que habilitem funcionalidades como *Tandem Connection* e Multiplexação de ODUs; (3) aplicar estudos estatísticos, aperfeiçoando e tornando mais próximo do real a geração de falhas na rede.
- Plano de gerência: (4) Estudar com maior profundidade a recomendação ITU-T G.874 e implementar os componentes ainda não implementados, como MIB, funções de data e hora, e outras gerências não abordadas nesta dissertação, como por exemplo, a gerência de desempenho; (5) Modificar as

mensagens utilizadas para comunicação entre os gerentes, de forma que se adequem a estrutura de dados descrita na recomendação ITU-T G.874.1.

- Plano de controle: (6) estudar e implementar a recomendação ITU-T G.8080, integrando os protocolos GMPLS com a arquitetura ASON; (7) estudar e implementar os documentos OIF relativos às interfaces UNI (*User-Network Interface*) e NNI (*Network-Network Interface*).

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELOS, P. P. F. **Análise Arquitetural, Ontológica e Proposta de Modelo de Referência para a Recomendação ITU-T G.805**. Vitória. 2011.

FARREL, A.; BRYSKIN, I. **GMPLS: Architecture and Applications**. San Francisco: Elsevier, 2006.

FAVORETO, F. P. **Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 131. 2009.

FERRARI, F. F. **Simulação da Funcionalidade de Descoberta Automática Aplicada às Redes OTN**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 83. 2009.

FERRARI, F. F.; FRASSON, A. M.; GARCIA, A. S. Descoberta Automática em Redes Ópticas de Transporte. **MOMAG2010**, Vitória, 2010.

FRIGINI, F. N. **Modelagem Das Camadas Digitais De Uma Rede Óptica De Transporte No Simulador OMNeT++ De Acordo Com A Recomendação ITU-T G.798**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 71. 2010.

IMAJUKU, W.; MORISHITA, S. A Multi-Area MPLS/GMPLS Interoperability Trial over ROADM/OXC Network. **IEEE Communications Magazine**, Fevereiro 2009.

INIEWSKI, K.; MCCROSKY, C.; MINOLI, D. **Network Infrastructure And Architecture**. New Jersey: Wiley Interscience, 2008.

ITU-T. **G.805: Generic functional architecture of transport networks**. [S.l.]. 2000.

ITU-T. **G.872: Architecture of Optical Transport Networks**. [S.l.]. 2001.

ITU-T. **G.7714: Generalized automatic discovery for transport entities**. [S.l.], p. 30. 2005.

ITU-T. **G.8080: Architecture for the automatically switched optical network (ASON)**. [S.l.]. 2006.

ITU-T. **G.800: Unified functional architecture of transport networks**. [S.l.]. 2007.

ITU-T. **G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)**. [S.l.], p. 219. 2009.

ITU-T. **G.7714.1: Protocol for automatic discovery in SDH and OTN networks**. [S.l.], p. 44. 2010.

ITU-T. **G.798 : Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks**. International Telecommunication Union (ITU). [S.l.], p. 384. 2010.

ITU-T. **G.874: Management aspects of the optical transport network element**. [S.l.], p. 56. 2010.

ITU-T. Standardization (ITU-T). Disponível em: <<http://www.itu.int/ITU-T/>>. Acesso em: 19 Julho 2011.

JERUCHIM, M. C.; BALABAN, P.; SHANMUGAN, K. S. **Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques**. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002.

KARTALOPOULOS, S. V. **Next Generation Intelligent Optical Networks**. Tulsa: Springer, 2008.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical Networks - A Pratical Perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

SANTOS, E. R. D. **Características dos blocos funcionais do Equipamento da Hierarquia de rede óptica de Transporte no mapeamento ITU-T G.798**. UFES. Vitória, p. 222. 2009.

TAKIHIRO, M. et al. Optical Network Systems for Next-generation Networks. **Hitachi Review Vol.58**, Fevereiro 2009.

TESSINARI, R. S. **Mapeamento de Equipamentos Ópticos e Modelagem de Redes OTN no Simulador OMNeT++ de acordo com a Recomendação ITU-T G.798**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 75. 2009.



VAISHAMPAYAN, R. et al. **Application Driven Comparison of T-MPLS\_MPLS-TP and PBB-TE – Driver Choices for Carrier Ethernet**. IEEE. [S.l.]. 2009.

## ANEXO A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste Anexo são apresentados os equipamentos utilizados, que não são modelados nesta dissertação.

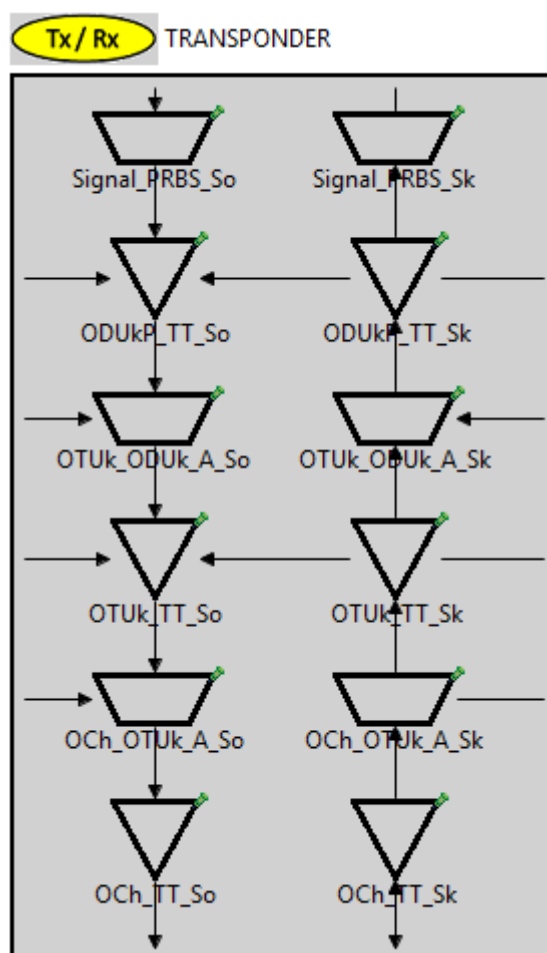


Figura A-1: Módulo transponder (FRIGINI, 2010).

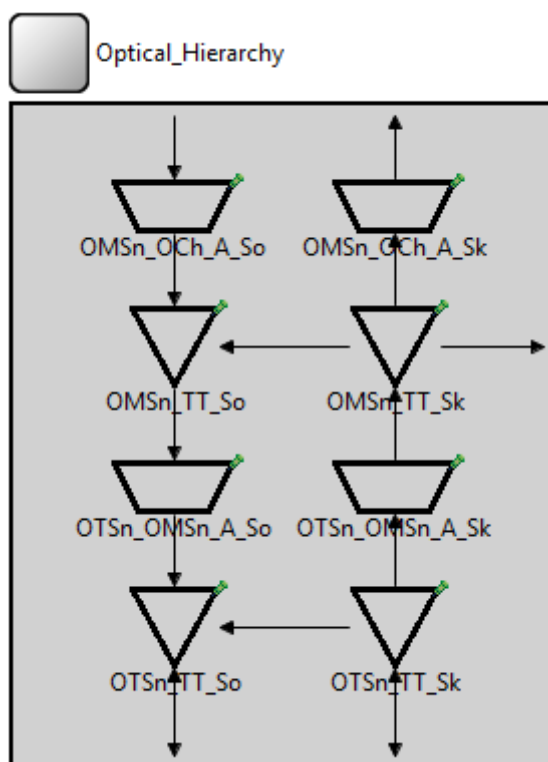


Figura A-2: Hierarquia óptica (TESSINARI, 2009).

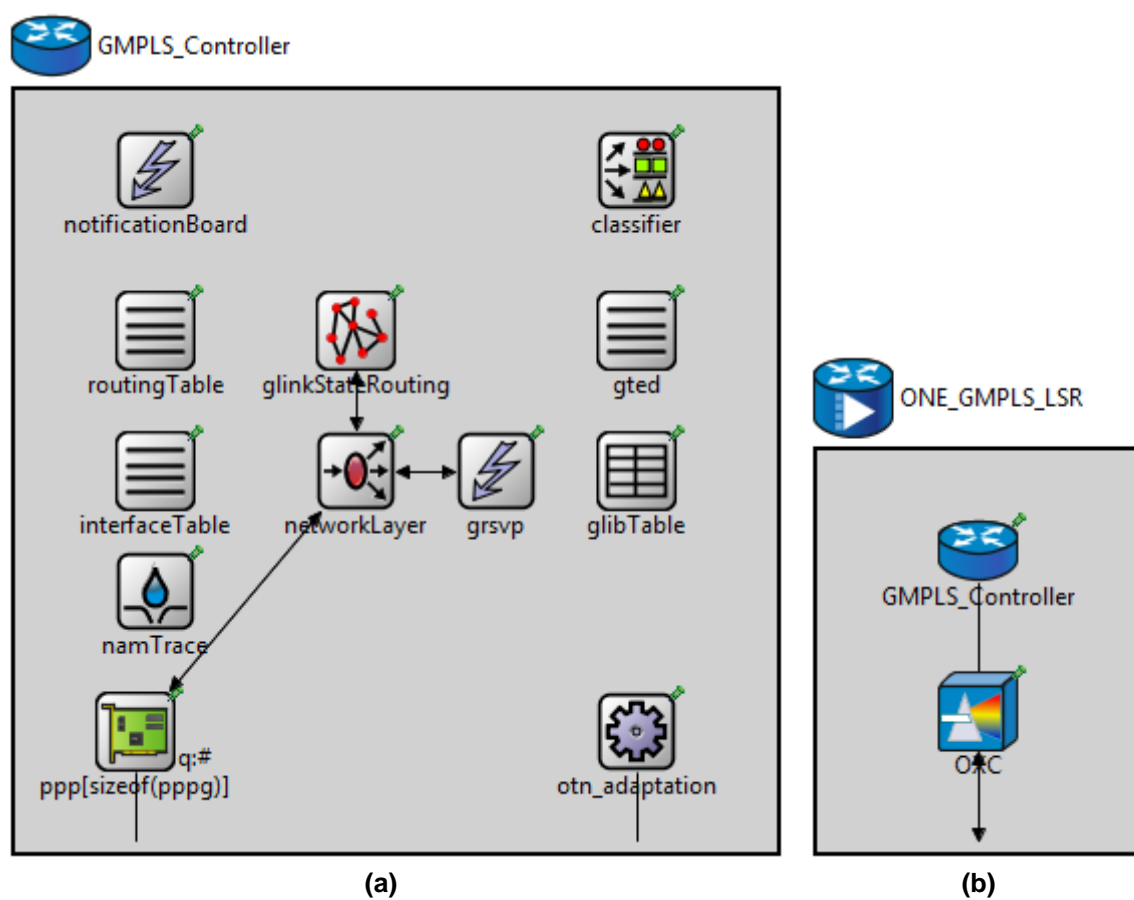


Figura A-3: (a) Controlador GMPLS. (b) LSR GMPLS. (FAVORETO, 2009)

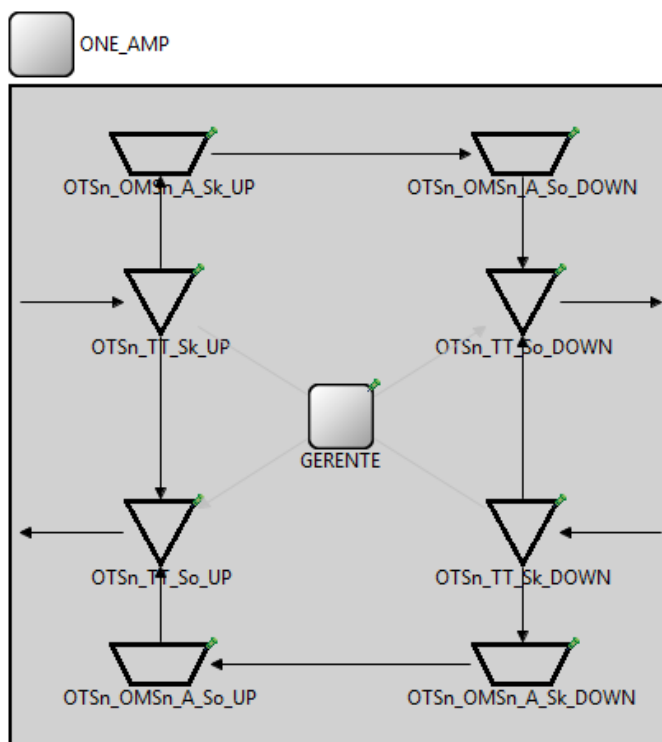


Figura A-4: ONE Amplificador bidirecional. (TESSINARI, 2009)

## ANEXO B – RESULTADOS DE OUTROS TRABALHOS

A Figura B-1 apresenta alguns trechos do arquivo de *log* gerado pela sinalização dos protocolos do GMPLS durante o estabelecimento de um OCh LSP. (FAVORETO, 2009)

```
//LOG GERADO NO ESTABELECIMENTO DE UM OCh LSP

TesteGMPLS.lsr1.gmpls.grsvp, 1: enviando mensagem de PATH de
10.1.1.1 para 10.1.2.1
    lspId=100, TE link (porta local)=10.1.1.1, link componente
(rótulo) downstream=1 e upstream=2
...
TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 1.2000001912: recebimento e
processamento de mensagem de PATH referente a lspId=100

TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 1.2000001912: instalando rótulo (na
gLibTable) para a lspId=100
    formato (inInterface, inLabel, outInterface, outLabel)
downstream: (ppp1,1,lo0,1)
tempo de configuração do OXC: 2
upstream: (lo0,2,ppp1,2)
tempo de configuração do OXC: 2

TesteGMPLS.lsr4.gmpls.grsvp, 3.2000001912: enviando mensagem de
RESV de 10.1.4.1 para 10.1.2.1
    lspId=100, TE link (porta remota)=10.1.2.2, link componente
(rótulo)=1
...
TesteGMPLS.lsr4.oxc.OCH_C, 3.7: comutação do sinal optico
(host2MSG) - mapeamento porta/lambda: (2/2)->(1/2)
...
TesteGMPLS.lsr1.gmpls.grsvp, 4.9000002448: instalando rótulo (na
gLibTable) para a lspId=100
    formato (inInterface, inLabel, outInterface, outLabel)
downstream: (lo0,1,ppp0,1)
tempo de configuração do OXC: 1
upstream: (ppp0,2,lo0,1)
tempo de configuração do OXC: 1
...
TesteGMPLS.lsr1.oxc.OCH_C, 6.2: comutação do sinal optico
(host1MSG) - mapeamento porta/lambda: (2/1)->(0/1)
```

Figura B-1: Trecho do arquivo de *log* gerado durante o estabelecimento de um OCh LSP.  
(FAVORETO, 2009)

## APÊNDICE I – CLASSES , MENSAGENS E MÓDULOS SIMPLES

Este apêndice apresenta as classes de algumas de funções atômicas, classes de mensagens e módulos simples na linguagem NED.

```
class cOTSn_TT_Sk : public cSimpleModule
{
private:
/* External Parameters */
int num_wavelengths; double min_power; bool *payload_fail;

/* Defect related attributes */
bool dLOS_P; bool dLOS_O; bool dBDI_P; bool dBDI_O; bool dPMI; bool dTIM;

/* Alarm related attributes */
bool aTSF_P; bool aTSF_O; bool aBDI_P; bool aBDI_O;

/* Correlation related attributes */
bool cLOS; bool cLOS_P; bool cLOS_O; bool cBDI; bool cBDI_P; bool cBDI_O; bool cTIM;

/* Received from management and TTI related attributes */
string MI_ExSAPI; string MI_ExDAPI; bool MI_TIMActDis; string RxTI; string AcTI;
short int MI_TIMDetMo; /* 0 = disabled; 1 = SAPI; 2 = DAPI; 3 = SAPI + DAPI */

protected:
void initialize();
void handleMessage(cMessage *msg);
void Separate_payload_and_OSC(cMessage *msg);
void Los_supervision(OTNMsg *otnmsg);
void OSC_termination(cMessage *msg);
void OTS_OH_access(OHMsg *OSC);
void process_TTI();
void defect_correlation();
void consequent_actions();
void performance_monitoring();
void report_to_localmanager();
};
```

Figura I-1: Implementação da classe cOTSn\_TT\_Sk.

```

// Client Signal
packet ClientMsg
{
    string SignalType;
}
// OPU Layer Overhead
packet OPUMsg
{
    unsigned char OPUK_PT;
}
// ODU Layer Message
packet ODUMsg {
    string PM_ODUK_TxTI;
    int PM_ODUK_BIP8;
    bool PM_ODUK_BDI;
    bool PM_ODUK_BEI;
    string PM_ODUK_STAT;

    bool msgFailure;
}
// OTU Layer Overhead
packet OTUMsg {
    string SM_OTUK_TxTI;
    int SM_OTUK_BIP8;
    bool SM_OTUK_BDI;
    bool SM_OTUK_BEI;
    bool SM_OTUK_BIAE;
    bool SM_OTUK_IAE;

    string FAS;
    int MFAS;

    bool msgFailure;
}
// OCh Layer Overhead
packet OChOHMsg {
    bool OCh_FDI_P;
    bool OCh_FDI_O;
    bool OCh_OCI;
}
// Optical layers overhead
packet OHMsg {
    string OTSn_TxTI;
    bool OTSn_BDI_P;
    bool OTSn_BDI_O;
    bool OTSn_PMI;

    bool OMSn_BDI_P;
    bool OMSn_BDI_O;
    bool OMSn_FDI_P;
    bool OMSn_FDI_O;
    bool OMSn_PMI;

    bool OCh_OCI[wavelengths];
}
//Optical transmission module Overhead
packet OOSMsg {
    bool hasControlInfo;
}
// Signalization Message
packet SIGNALMsg
{
    bool valor;
    int dataInt;
    string dataString;
}

```

(c)

(d)

(b)

(a)

Figura I-2: (a) Sinais clientes e das camadas digitais. (b) Sinais de cabeçalho das camadas ópticas e canal de supervisão. (c) Sinal de alarmes. (d) Sinal óptico.

```

// Frame periods, according to Table 7-4, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 (12/2009). PG.28.
#define ODU1_FRAMETIME 0.000048971000
#define ODU2_FRAMETIME 0.000012191000
#define ODU3_FRAMETIME 0.000003035000
#define ODU4_FRAMETIME 0.000001168000
#define TEST_FRAMETIME 0.001000000000

// Frame alignment signal (FAS), Value, Rec. ITU-T G.709/Y.1331 (12/2009), page 56.
#define FAS_VALUE "111101101111011011110110001010000010100000101000" // OA1 is "1111 0110".
#define FAS_ERROR "111111111111111111111111000000000000000000000000" // Error in FAS.

// MultiFrame alignment signal (MFAS)
#define MFAS_ERROR -404 // MFAS error value.

// ODUk PM status interpretation. Table 15-3. Rec. ITU-T G.709/Y.1331 (12/2009). Page 64.
#define NORMAL_PATH_SIGNAL_PM_STAT "001" // 001 Normal path signal
#define ODUK_LCK_MAINTENANCE_SIGNAL_ODUK_PM_STAT "101" // 101 Maintenance signal: ODUk-LCK
#define ODUK_OCI_MAINTENANCE_SIGNAL_ODUK_PM_STAT "110" // 110 Maintenance signal: ODUk-OCI
#define ODUK_AIS_MAINTENANCE_SIGNAL_ODUK_PM_STAT "111" // 111 Maintenance signal: ODUk-AIS


// BIP8 CODES
#define BIP8_INITIALIZE -1
#define BIP8_ERROR -404

// Payload type code. Table 15-8. Rec. ITU-T G.709/Y.1331 (12/2009). PG 76.
#define NULL_PLD_SIGNAL_CODE 0xFD // NULL test signal mapping, see 17.4.1.
#define PRBS_PLD_SIGNAL_CODE 0xFE // PRBS test signal mapping, see 17.4.1.

```

Figura I-3: Trecho do arquivo de configuração OTN\_Config.h.





```

cLocalManager
simple cLocalManager
{
    parameters:
        int num_wavelengths;

    gates:
        // Connection with NEManager
        inout NEManager;

        // Generic connection with Atomic Functions
        input report_gate @directIn;

        // Management Points
        inout OTSn_TT_Sk_MP;
        output OTSn_TT_So_MP;
        input OMSn_TT_Sk_MP;
        input OCh_TT_Sk_MP[num_wavelengths];
        inout OCh_OTUk_a_A_Sk_MP[num_wavelengths];
        output OCh_OTUk_a_A_So_MP[num_wavelengths];
        inout OTUk_TT_Sk_MP[num_wavelengths];
        output OTUk_TT_So_MP[num_wavelengths];
        output OTUk_ODUk_A_So_MP[num_wavelengths];
        output OTUk_ODUk_A_Sk_MP[num_wavelengths];
        inout ODUkP_TT_Sk_MP[num_wavelengths];
        output ODUkP_TT_So_MP[num_wavelengths];
        output ODUkP_PRBS_A_So_MP[num_wavelengths];
        inout ODUkP_PRBS_A_Sk_MP[num_wavelengths];
}

```

Figura I-4: Arquivo NED do Gerente Local.

```

class cLocalManager : public cSimpleModule
{
private:
    OTSinfo otsinfo;
    OMSinfo omsinfo;
    vector<OCHinfo> ochinfo;
    vector<OTUinfo> otuinfo;
    vector<ODUinfo> oduinfo;
    vector<ODU_A_PRBSinfo> odu_prbs_ainfo;
    vector<OCH_OTU_a_Ainfo> och_otu_ainfo;
    vector<OTU_ODU_Ainfo> otu_odu_ainfo;

protected:
    void initialize();
    void handleMessage(cMessage *msg);
    void report_to_NEManager(int layer, int TCP_ID_Sk, int TCP_ID_So, bool Delete);
    void report_alarm_changes_to_NEManager(int layer, int TCP_ID_Sk, string alarm,
    void report_alarm_changes_to_NEManager(int layer, int TCP_ID_Sk, string alarms,
    void update_tcp_information(TCP_ID_Information *reportMSG);
    void update_OTS_information(OTSn_TT_MI *OTS_MI);
    void update_OMS_information(OMSn_TT_MI *OMS_MI);
    void update_OCH_information(OCh_TT_MI *OCH_MI);
    void update_OTU_information(OTUk_TT_MI *OTU_MI);
    void update_ODU_information(ODUkP_TT_MI *ODU_MI);
    void update_ODU_PRBS_A_information(ODUkP_PRBS_A_MI *ODU_PRBS_A_MI);
    void update_OCH_OTU_a_A_information(OCh_OTUk_a_A_MI *OCH_OTU_a_A_MI);
    void update_layers_parameters(ChangeFieldChar *changeMSG);
    int find_index(int layer, int TCP_ID);
};

```

Figura I-5: Classe cLocalManager.cc.

```

// From AFs to Local Manager          // Msg exchanged between Local Manager and NE Manager
packet TCP_ID_Information              message Manager_Information extends TCP_ID_Information
{
    int layerTCP;                      {
    int uniTCP_ID_Sk;                  int localManager_ID;
    int uniTCP_ID_So;                  bool change;
    bool Delete;                      }
}
// Used to modify fields at NE Manager
message ChangeField extends TCP_ID_Information
{
    bool write;
    string field;
}
// If field is a char*                  // If field is a bool
message ChangeFieldChar extends ChangeField message ChangeFieldBool extends ChangeField
{
    string charValue;                  {
    bool isDiscovery;                  int numberOfChanges;
                                    bool boolValue;
}                                     }

```

Figura I-6: Mensagens utilizadas pelo plano de gerência.

```

// OTS Management Information
message OTSn_TT_MI extends TCP_ID_Information
{
    // OTSn_TT_Sk_MP inputs:
    string OTSn_TT_Sk_MI_ExSAPI;
    string OTSn_TT_Sk_MI_ExDAPI;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_GetAcTI;
    int OTSn_TT_Sk_MI_TIMDetMo;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_TIMActDis;

    // OTSn_TT_Sk_MP outputs:
    string OTSn_TT_Sk_MI_AcTI;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cTIM;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cBDI;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cBDI_P;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cBDI_O;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cLOS_P;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cLOS_O;
    bool OTSn_TT_Sk_MI_cLOS;
}

// OMS Management Information
message OMSn_TT_MI extends TCP_ID_Information
{
    // OMSn_TT_Sk_MP outputs:
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cSSF_P;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cSSF_O;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cSSF;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cBDI;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cBDI_P;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cBDI_O;
    bool OMSn_TT_Sk_MI_cLOS_P;
}

// OCh Management Information
message OCh_TT_MI extends TCP_ID_Information
{
    // OCh_TT_Sk_MP outputs:
    bool OCh_TT_Sk_MI_cLOS_P;
    bool OCh_TT_Sk_MI_cOCI;
    bool OCh_TT_Sk_MI_cSSF;
    bool OCh_TT_Sk_MI_cSSF_P;
    bool OCh_TT_Sk_MI_cSSF_O;
}

// OCh/OTU Management Information
message OCh_OTUk_a_A_MI extends TCP_ID_Information
{
    // OCh_OTUk_A_So_MP input:
    bool OCh_OTUk_a_A_So_MI_Active;

    // OCh_OTUk_A_Sk_MP input:
    bool OCh_OTUk_a_A_Sk_MI_Active;
    bool OCh_OTUk_a_A_Sk_MI_FECEn;

    // OCh_OTUk_A_Sk_MP outputs:
    bool OCh_OTUk_a_A_Sk_MI_cLOM;
    bool OCh_OTUk_a_A_Sk_MI_cLOF;
}

// OTU Management Information
message OTUk_TT_MI extends TCP_ID_Information
{
    // OTUk_TT_Sk_MP inputs:
    string OTUk_TT_Sk_MI_ExSAPI;
    string OTUk_TT_Sk_MI_ExDAPI;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_GetAcTI;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_TIMDetMo;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_TIMActDis;

    // OTUk_TT_Sk_MP outputs:
    string OTUk_TT_Sk_MI_AcTI;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_cTIM;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_cDEG;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_cBDI;
    bool OTUk_TT_Sk_MI_cSSF;
}

// ODU Management Information
message ODUkP_TT_MI extends TCP_ID_Information
{
    // ODUkP_TT_Sk_MP inputs:
    string ODUkP_TT_Sk_MI_ExSAPI;
    string ODUkP_TT_Sk_MI_ExDAPI;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_GetAcTI;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_TIMDetMo;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_TIMActDis;

    // ODUkP_TT_Sk_MP outputs:
    string ODUkP_TT_Sk_MI_AcTI;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cTIM;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cDEG;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cBDI;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cSSF;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cOCI;
    bool ODUkP_TT_Sk_MI_cLCK;
}

// ODU/PRBS Management Information
message ODUkP_PRBS_A_MI extends TCP_ID_Information
{
    // ODUkP_PRBS_A_Sk inputs:
    bool ODUkP_PRBS_A_Sk_MI_Active;

    // ODUkP_PRBS_A_Sk outputs:
    bool ODUkP_PRBS_A_Sk_MI_cPLM;
    string ODUkP_PRBS_A_Sk_MI_AcPT;
    bool ODUkP_PRBS_A_Sk_MI_cLSS;
    int ODUkP_PRBS_A_Sk_MI_pN_TSE;

    // ODUkP_PRBS_A_So inputs:
    bool ODUkP_PRBS_A_So_MI_Active;
    int ODUkP_PRBS_A_So_MI_Nominal_Bitrate_and
}

```

Figura I-7: Mensagens representando os sinais trocados com as funções atômicas.

```

// Message from OTN_Adaptation to NEManager
message control_plane_Request
{
    int portIn;
    int inLabel;
    int portOut;
    int outLabel;
}

// Message from NEManager to OCh_C
message MI_MatrixControl extends TCP_ID_Information
{
    int fiberIN;
    int wavelengthIN;
    int fiberOUT;
    int wavelengthOUT;
}

```

**Figura I-8: Mensagens utilizadas na comunicação entre os planos de controle, gerência e transporte.**

## APÊNDICE II – EQUIPAMENTOS MODELADOS

Neste apêndice são apresentados os equipamentos e ONEs desenvolvidos nesta dissertação.

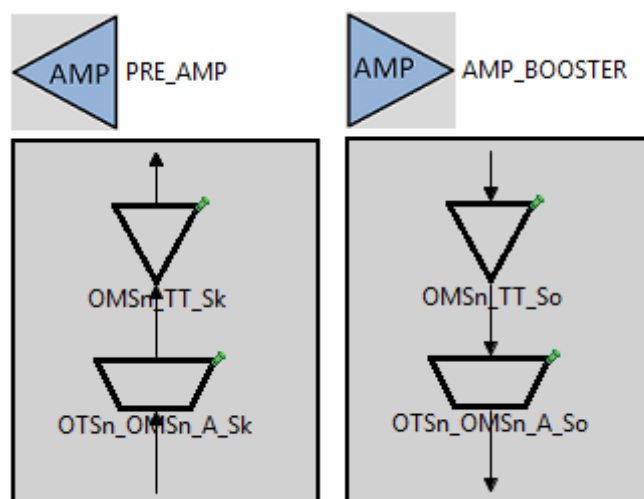


Figura II-1: Amplificadores.

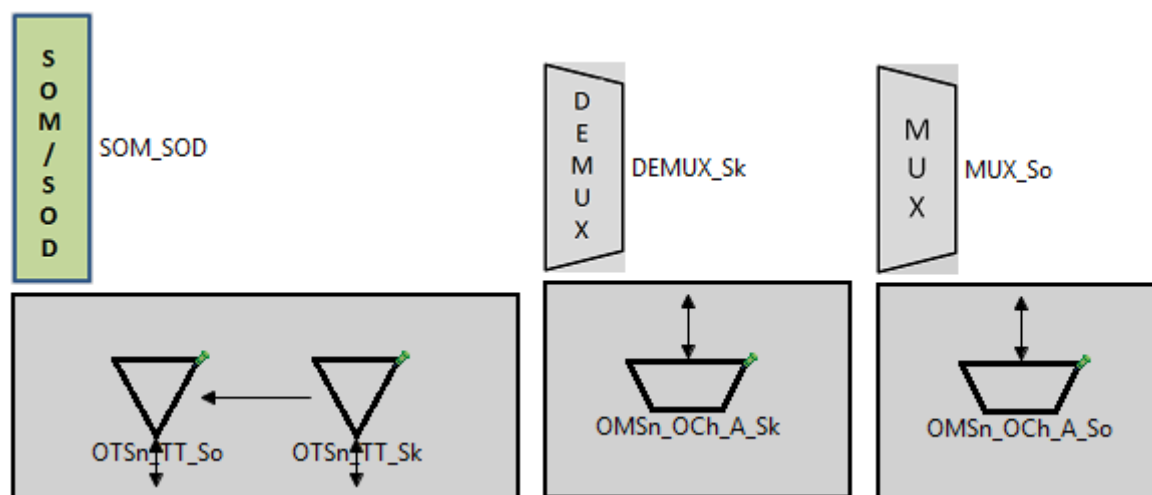


Figura II-2: Multiplexadores e Demultiplexadores.

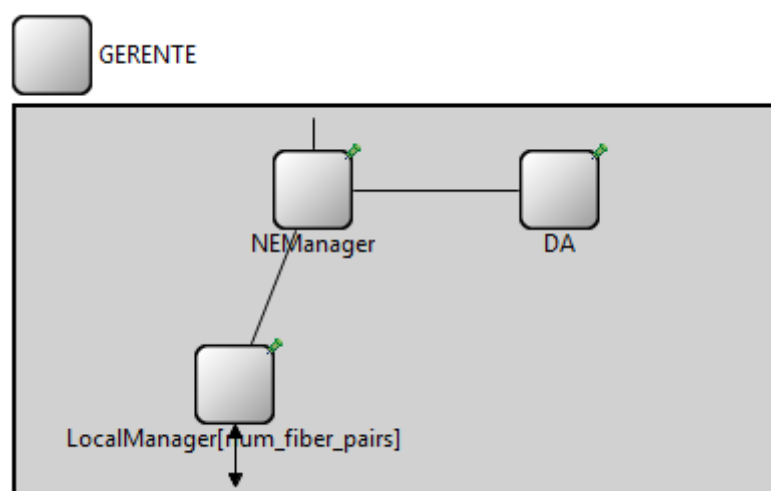


Figura II-3: Módulo gerente.

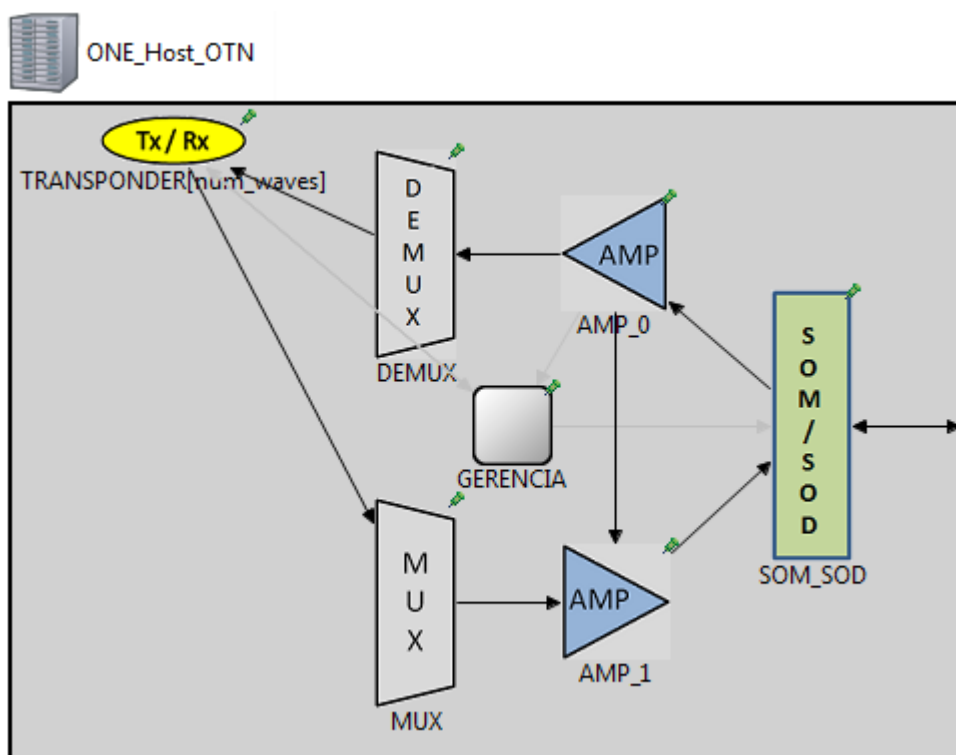
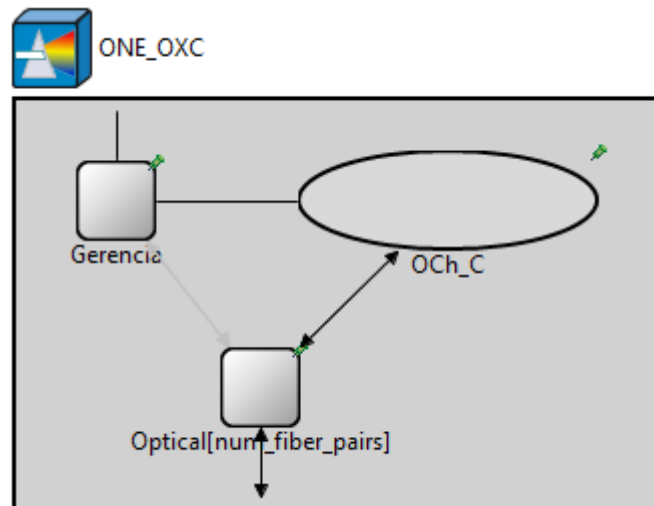


Figura II-4: ONE Host OTN.



**Figura II-5: ONE OXC.**

## APÊNDICE III – RESULTADOS OBTIDOS

```

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 8.
@TIME: 0.0035 ### Layer: (1) OTS / NE: 8 / TCP: 6 / Field: cBDI / Change to: TRUE
@TIME: 0.052471001 ### Layer: (2) OMS / NE: 8 / TCP: 7 / Field: cBDI_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.098442002 ### Layer: (5) OTU / NE: 8 / TCP: 3 / Field: cBDI / Change to: TRUE
@TIME: 0.098442002 ### Layer: (7) ODU / NE: 8 / TCP: 5 / Field: cBDI / Change to: TRUE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 46.
@TIME: 0.0001 ### Layer: (1) OTS / NE: 46 / TCP: 0 / Field: cLOS / Change to: TRUE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 60.
@TIME: 0.0002 ### Layer: (1) OTS / NE: 60 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0022 ### Layer: (1) OTS / NE: 60 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 85.
@TIME: 0.0003 ### Layer: (1) OTS / NE: 85 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0003 ### Layer: (2) OMS / NE: 85 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0033 ### Layer: (1) OTS / NE: 85 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE
@TIME: 0.051171001 ### Layer: (1) OTS / NE: 85 / TCP: 2 / Field: cBDI_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.051171001 ### Layer: (2) OMS / NE: 85 / TCP: 3 / Field: cBDI_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.100142002 ### Layer: (1) OTS / NE: 85 / TCP: 2 / Field: cBDI_P / Change to: FALSE
@TIME: 0.100142002 ### Layer: (2) OMS / NE: 85 / TCP: 3 / Field: cBDI_P / Change to: FALSE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 99.
@TIME: 0.0004 ### Layer: (1) OTS / NE: 99 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.050371001 ### Layer: (1) OTS / NE: 99 / TCP: 0 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE

LOG de alteracoes de MI recebidas pelo NE_Manager 102.
@TIME: 0.0005 ### Layer: (1) OTS / NE: 102 / TCP: 6 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0005 ### Layer: (2) OMS / NE: 102 / TCP: 7 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0005 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0005 ### Layer: (5) OTU / NE: 102 / TCP: 3 / Field: cDEG / Change to: TRUE
@TIME: 0.0005 ### Layer: (7) ODU / NE: 102 / TCP: 5 / Field: cDEG / Change to: TRUE
@TIME: 0.0025 ### Layer: (1) OTS / NE: 102 / TCP: 6 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE
@TIME: 0.0025 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cSSF_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.0025 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (5) OTU / NE: 102 / TCP: 3 / Field: cSSF / Change to: TRUE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (5) OTU / NE: 102 / TCP: 3 / Field: cDEG / Change to: FALSE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (7) ODU / NE: 102 / TCP: 5 / Field: cSSF / Change to: TRUE
@TIME: 0.049471001 ### Layer: (7) ODU / NE: 102 / TCP: 5 / Field: cDEG / Change to: FALSE
@TIME: 0.051471001 ### Layer: (2) OMS / NE: 102 / TCP: 7 / Field: cLOS_P / Change to: FALSE
@TIME: 0.051471001 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cLOS_P / Change to: TRUE
@TIME: 0.051471001 ### Layer: (3) OCH / NE: 102 / TCP: 1 / Field: cSSF_P / Change to: FALSE

```

Figura III-1: Log completo gerado na simulação de falha na fibra.